

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

На правах рукописи

ПИЧУЕВ АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ

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

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

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

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	
1.1. Общая характеристика проблемы обеспечения контроля изоляции и защитного отключения в подземных электрических сетях.....	14
1.2. Состояние вопроса научных исследований в области контроля изоляции и защитного отключения	21
1.2.1. Исследования в области контроля изоляции в подземных электрических сетях	21
1.2.2. Исследования в области защитного отключения в подземных электрических сетях	37
1.2.3. Исследования влияния переходных процессов в подземных электрических сетях на электробезопасность.....	51
1.3. Обоснование цели и постановка задач диссертационного исследования.....	60
2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	
2.1. Исходные положения	63
2.2. Обоснование метода исследования несимметричных режимов утечки тока в подземных электрических сетях	65
2.3. Обоснование метода исследования режимов утечки тока с учетом процесса генерирования электродвигателями обратной ЭДС.....	88
2.4. Алгоритм и программа расчета параметров математической модели подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока	95
2.5. Синтез схем замещения подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока.....	101
2.6. Выводы	113

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ	
3.1. Исходные положения.....	114
3.2. Сравнительный анализ режимов однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию подземной электрической сети.....	116
3.3. Результаты исследования и оценка уровня несимметрии фазных напряжений при различных режимах утечки тока через изоляцию.....	125
3.4. Анализ влияния низкочастотной поляризации на токи утечки через изоляцию в подземной электрической сети.....	135
3.5. Метод оценки безопасности режимов утечки тока	146
3.6. Метод и средства пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостной составляющей тока утечки.....	161
3.7. Выводы.....	172
4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	
4.1. Исходные положения.....	174
4.2. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания скребкового конвейера.....	176
4.3. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания очистного комбайна.....	202
4.4. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания ленточного конвейера.....	216
4.5. Устройство комбинированного динамического торможения электродвигателя в подземной комбинированной электрической сети	225
4.6. Выводы	233
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ	
5.1. Исходные положения	235
5.2. Исследование переходных процессов в цепях утечки тока за время срабатывания УЗО.....	236

5.3. Исследование переходных процессов цепях утечки тока в режиме генерирования электродвигателями обратной ЭДС.....	248
5.4. Методика и алгоритм расчета токов утечки в подземной электрической сети.....	260
5.5. Экспериментальные исследования переходных процессов в подземных электрических сетях	265
5.6. Устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети.....	278
5.7. Выводы	284
Заключение	285
Перечень сокращений. Термины и определения	288
Список литературы	293
Приложение	326

ВВЕДЕНИЕ

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

участковых 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., Гладилин 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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

1.1. Общая характеристика проблемы обеспечения контроля изоляции и защитного отключения в подземных электрических сетях

Характеристика современного состояния подземных электрических сетей, электротехнических комплексов и перспективы развития

Современные схемы электроснабжения добычных и проходческих участков напряжением 380 – 1140 В промышленной частоты включают в себя: силовые трансформаторы передвижных участковых трансформаторных подстанций (ПУПП) мощностью до 2500 кВ·А; автоматические выключатели серий АФВ, АВВ и АВДО; устройства защиты от токов утечки (УЗТУ) типа УАКИ, САЗУ, АЗУР; распределительные пункты низкого напряжения (РП-НН), формируемые из магнитных пускателей серий ПВИ, ПВИТ, ПЭШ(Р), ПВВ и станций управления типа СУВ, СУВК, СУВЛ, КУУВМ, КСМ и др.; магистральные кабели марки СБнУ, ЭВТ, ПВШЭ, ВВБбГ, ВСТШв и др., гибкие кабели ответвлений марки КГЭШ, КГпЭНШ, КГТЭКШ, КГЭС и др., передающие электроэнергию к электрическим машинам и механизмам.

Установленная мощность шахтного электрооборудования достигла 1,5 – 2 МВт. В высокопроизводительных угольных шахтах для питания потребителей выемочных и проходческих участков применяется напряжение 660 В и 1140 В, с последовательным переходом на 3300 В для очистных комбайнов с суммарной мощностью приводов резания до 2200 кВт, скребковых конвейеров (до 2500 кВт) и ленточных конвейеров (до 1200 кВт). Широко внедряется частотно-регулируемый электропривод с преобразователями частоты на мощность до 600 кВт (660 – 1140 В) и до 1200 кВт (3300 В).

До настоящего времени на выемочных участках добычи угля с мощностью пласта до 4 м и протяженностью лавы до 400 м находили применение очистные комбайны серии «Урал», К-500, УКД, УКН и КСП (производство Копейского,

Юргинского и Ясиноватского машиностроительных заводов) с номинальной мощностью электродвигателей привода резания 180 – 550 кВт и приводом подачи суммарной мощностью 60 – 90 кВт напряжением 660/1140 В.

На высокопроизводительных добычных участках с мощностью пласта до 9 м и протяженностью лавы до 600 м широко применяются комбайны фирм *EICHOFF BERGBAUTECHNIK GMBH*, *JOY MINING MACHINERY*, *T. MACHINERY A.S.*, *KOMATSU* с номинальной мощностью электродвигателей 2×125 – 2×450 кВт (привод резания) и приводом подачи мощностью 2×16 – 2×85 кВт напряжением 660/1140 В.

Особое место занимают очистные комбайны фирм *EICHOFF*, *JOY*, *T. MACHINERY A.S.*, *KOMATSU*, работающих на напряжении 3300 кВ с установленной мощностью электродвигателей привода резания 2×300 – 2×850 кВт и механизма подачи 2×50 – 2×140 кВт.

Управление электродвигателями привода механизма подачи комбайнов осуществляется преобразователями частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения мощностью до 1200 кВт.

Переход на более высокий класс напряжения обуславливает особенную специфику построения подземной участковой распределительной электрической сети. Как правило, структура электрической сети представляет собой энергопоезд в составе передвижной участковой понизительной подстанции мощностью до 2500 кВА с встроенными автоматическими выключателями и устройствами защиты от токов утечки, магнитной станции или специальных магнитных пускателей и преобразователей частоты головных электродвигателей механизма подачи. По кабельным линиям осуществляется питание электродвигателей привода резания, встроенных в корпус комбайна и двигателей механизма подачи. При этом в зависимости от соответствия класса напряжения сети и электродвигателей используются устанавливаемые в корпусе комбайна понизительные трансформаторы 1140/660 В, которые в зависимости от группы соединения обмоток могут использоваться как разделительные (1140/1140 кВ, 660/660 В).

В состав очистного механизированного комплекса входят скребковые конвейеры и перегружатели указанных выше фирм производителей, конвейеры типа «Анжера», КСЮ, СП, КСД, СПЦ, СР, СК (производство Кировского, Юргинского, Донецкого, Дружковского, Новокраматорского и Харьковского машиностроительных заводов) с установленной мощностью приводных электродвигателей $(2 - 4) \times 55 - (2 - 3) \times 400$ кВт и 3×700 кВт, а также конвейеры типа *DH* и *СЗК* производства фирм *OSTROJ* и *T. MACHINERY A.S.* суммарной установленной мощностью 500 – 2400 кВт напряжением 660/1140 В.

Управление электродвигателями привода скребковых конвейеров также осуществляется преобразователями частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения.

Транспортировка добытого угля осуществляется ленточными конвейерами типа Л, ЛК, ЛТ, КЛ, *TP*, *DP* протяженностью более 1000 м с приводными электродвигателями $(2 - 3) \times 55 - (2 - 4) \times 315$ кВт на напряжении 380 – 1140 В.

Применение частотно-регулируемого электропривода асинхронных электродвигателей в составе подземных электротехнических комплексов имеет свои важные преимущества, главным из которых является возможность задания оптимальных режимов работы электромеханического оборудования и обеспечение максимальной эффективности при добыче и транспортировке угля.

Вместе с тем, существует ряд серьезных проблем, среди которых отмечаются следующие.

1. Применение преобразователей частоты приводит к появлению в подземной электрической сети высших гармонических составляющих напряжения, наличие которых значительно ухудшает качество электроэнергии и увеличивает ее потери.

2. Сокращение срока службы электрооборудования из-за повышенного нагрева изоляции токами высших гармонических составляющих и ухудшения ее состояния в связи с ростом скорости деградиационных процессов.

3. Увеличение погрешности измерительных приборов и ухудшение работы средств автоматики и релейной защиты [5, 295 – 297].

В настоящее время проблема повышения качества электроэнергии в подземных участковых электрических сетях является открытой, т.к. отсутствуют серийно выпускаемые во взрывозащищенном исполнении фильтро-компенсирующие устройства, токоограничивающие реакторы и синус-фильтры.

Факторы производства

Особое место, занимаемое горнодобывающей промышленностью в ряду других отраслей, обусловлено наличием специфических условий производства, имеющих объективный характер и, несомненно, оказывающих влияние на работу ЭТКС, т.к. имеются повышенные риски возникновения аварийных ситуаций в процессе ведения подземных горных работ.

Важнейшими факторами производственной среды являются: особый микроклимат, специфическая освещенность, шум и вибрация, тяжелые условия труда в ограниченном пространстве горных выработок, сложные горно-геологические и технологические условия ведения работ, высокая вероятность возникновения аварийных ситуаций, тяжелые условия эксплуатации горных машин и электромеханического оборудования.

В зависимости от регионального расположения шахты или рудника, а также глубины прохождения подземных выработок температура в зоне ведения работ может колебаться от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха в пределах 85 – 100%, уровень запыленности отдельных горных выработок иногда достигает 18 – 20 мг/м³. Одним из важных сопутствующих факторов является наличие в выработках агрессивных рудничных вод, обладающих высокой концентрацией кислот и щелочей, испарение которых оказывает отрицательное воздействие на микроклимат в зоне ведения работ и ведет к коррозии металлоконструкций.

Вопросы, связанные с устройством электроустановок, организацией эксплуатации и обеспечением безопасности регламентируются основными действующими нормативными документами [122 – 124, 126]. При этом, действия Правил распространяется и на электроустановки, работающие в специфических условиях горного производства.

Осуществляющие подземную добычу угля шахты являются опасными производственными объектами, подлежащими обязательной регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов.

Горные машины, механизмы, электрооборудование, приборы, аппаратура, средства защиты и материалы допускаются к эксплуатации при условии соответствия требованиям действующих «Правил безопасности в угольных шахтах» [122]. В нормативных и эксплуатационных документах на выпускаемое горно-шахтное оборудование обязательно указываются данные воспроизводимых им вредных производственных факторов и возможных опасностей при работе.

Все шахтные электроустановки должны отвечать требованиям правил устройства и эксплуатации электроустановок потребителей [124].

В электрических схемах обязательно предусматривается защита электроустановок от перегрузки и короткого замыкания, а также защита персонала от воздействия электрического тока и электромагнитного поля.

Применяемые на шахтах электрооборудование, кабели и системы электроснабжения должны обеспечить электробезопасность работников шахты, а также взрыво- и пожаробезопасность.

Защита от поражения электрическим током осуществляется с применением защитного заземления, а в подземных электроустановках – аппаратов защиты от утечек тока с автоматическим отключением поврежденной сети. При этом общее время отключения поврежденной сети напряжением до 660 В не должно превышать 0,2 с, а напряжением 1140 В – 0,12 с.

Особые требования предъявляются к уровню взрывозащиты электрооборудования, работающего в подземных выработках шахт, опасных по газу или пыли, в стволах и в надшахтных зданиях, примыкающих к этим стволам.

Требования по обеспечению искро- и пожаробезопасности регламентируются в [122] в отношении шахтных бронированных, полугибких и гибких кабелей, электрических проводок, стационарных и передвижных

электрических машин, коммутационных и пусковых аппаратов, средств защиты электрооборудования от токов короткого замыкания и утечек на землю.

При напряжении до 1140 В, наряду с устройствами релейной защиты, в шахтах применяется защита электрической сети от опасных токов утечки на землю автоматическими выключателями в комплексе с одним аппаратом защиты на всю электрически связанную сеть; при срабатывании аппарата защиты токов утечки должна отключаться вся сеть, подключенная к указанным трансформаторам, за исключением отрезка кабеля длиной не более 10 м, соединяющего трансформаторы с общесетевым автоматическим выключателем.

Общая длина кабелей, присоединенных к одному или параллельно работающим трансформаторам, должна ограничиваться емкостью относительно земли величиной не более 1 мкФ/ фазу.

В соответствии с [124] применяемое в электроустановках электрооборудование, электротехнические изделия и материалы должны соответствовать требованиям государственных стандартов или технических условий, утвержденных в установленном порядке.

Требования безопасности

В современных ЭТКС горных предприятий предъявляются высокие требования, как к профессиональной подготовке инженерно-технического персонала, так и в обеспечении необходимого уровня безопасности в производственных условиях.

Основные требования изложены в системе специальных стандартов безопасности труда ССБТ и ГОСТах [51, 156 – 158], общепромышленных нормативно-технических документах [123, 124], отраслевых правилах безопасности [122, 126].

Анализ опыта эксплуатации подземных электрических сетей горнодобывающих предприятий, а также анализ параметров и режимов работы электроустановок показывают, что несмотря на разработку и внедрение новых способов и средств контроля изоляции и защитного отключения уровень вероятности электротравматизма остается достаточно высоким.

Современный уровень технического прогресса в целом позволяет обеспечить высокую надежность работы электрооборудования, особенно в специфических условиях горнодобывающих предприятий.

Вопросы безопасной эксплуатации остаются актуальными, так как использование электроэнергии всегда представляет реальную опасность для людей.

Основными требованиями, предъявляемыми к электротехническим комплексам и системам электроснабжения горнодобывающих предприятий, являются высокая эксплуатационная надежность и безопасность работы электрооборудования и электрических сетей, обеспечение защиты от опасного воздействия электрического тока процессе работы в электроустановках.

Обеспечение безопасности при эксплуатации электрооборудования достигается путем осуществления контроля уровня сопротивления изоляции электрической сети, а также защитного отключения электрооборудования от источника питания в случаях возникновения недопустимо высоких уровней токов утечки.

Современные электроустановки представляют собой достаточно сложные электротехнические комплексы, для эффективной работы которых регламентированы режимы нейтрали электрической сети, типы исполнения электрооборудования, системы защиты от аварийных режимов работы, системы контроля состояния электрооборудования.

Опасность токов утечки определяет состояние изоляции электроустановок, что при несимметрии параметров изоляции фаз сети относительно земли может иметь еще более негативные последствия.

Таким образом, при решении вопросов обеспечения эффективной защиты от утечек тока необходимо наиболее полно учитывать условия производства, природно-климатические и технологические факторы, вероятность возникновения травмоопасных ситуаций и возможные последствия воздействия на человека электрического тока [319].

1.2. Состояние вопроса научных исследований в области контроля изоляции и защитного отключения

1.2.1. Исследования в области контроля изоляции в подземных электрических сетях

Одна из первых развернутых классификаций методов контроля параметров изоляции электроустановок (ЭУ) напряжением до 1000 В приведена в монографии [40]. В работах д.т.н. Л.В. Гладилина и д.т.н. В.И. Щуцкого [41, 49, 197, 200, 207] обобщен опыт развития направления научных исследований в области обоснования методов и разработки средств контроля изоляции на различных принципах измерения полного сопротивления (проводимости) электроустановки и его составляющих, определения напряжения и тока нулевой последовательности.

На рисунке 1.1 приведена классификация методов определения параметров изоляции ЭУ напряжением до 1 кВ.

В работе подробно рассмотрены: метод амперметра-вольтметра (метод Л.В. Гладилина) [43] и его модификации [1, 41, 53, 68]; методы, основанные на принципе активного двухполюсника [106] и фазочувствительные методы [16, 47].

Следует отметить, что за время, прошедшее с момента публикации данной монографии было разработано большое количество способов и средств контроля параметров изоляции, базирующихся на методах и принципах, обобщенных в этой классификации.

Существенный вклад в развитие теории электробезопасности в области разработки методов и принципов действия УЗО внесен д.т.н. А.И. Сидоровым (ЮУрГУ). В своих научных работах им предложены новые способы определения параметров сопротивления изоляции на основе измерения режимных параметров электроустановок, что отражено в представленной на рисунке 1.2 классификации [211, 270].

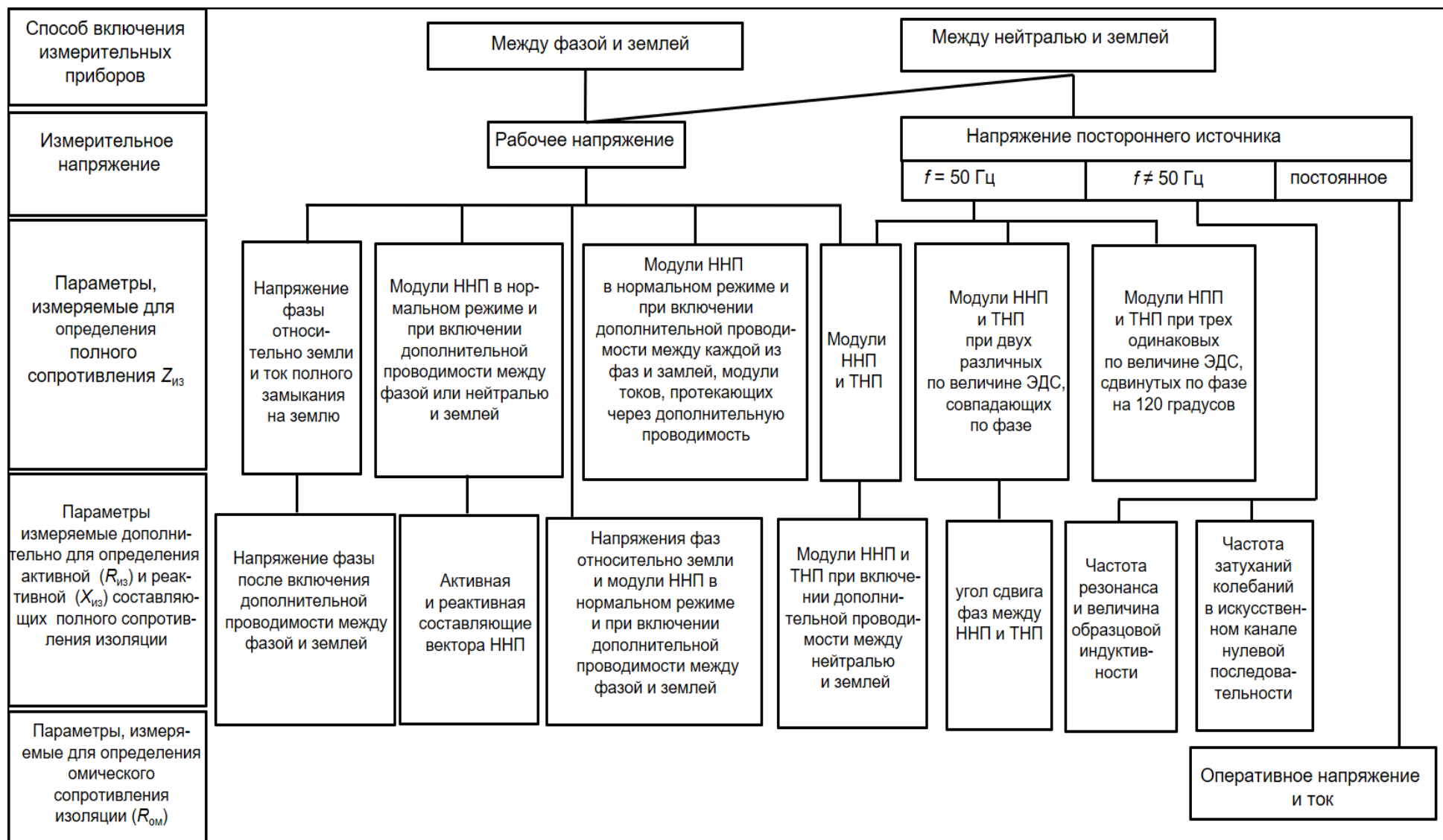


Рисунок 1.1 – Классификация методов определения параметров изоляции ЭУ напряжением до 1 кВ

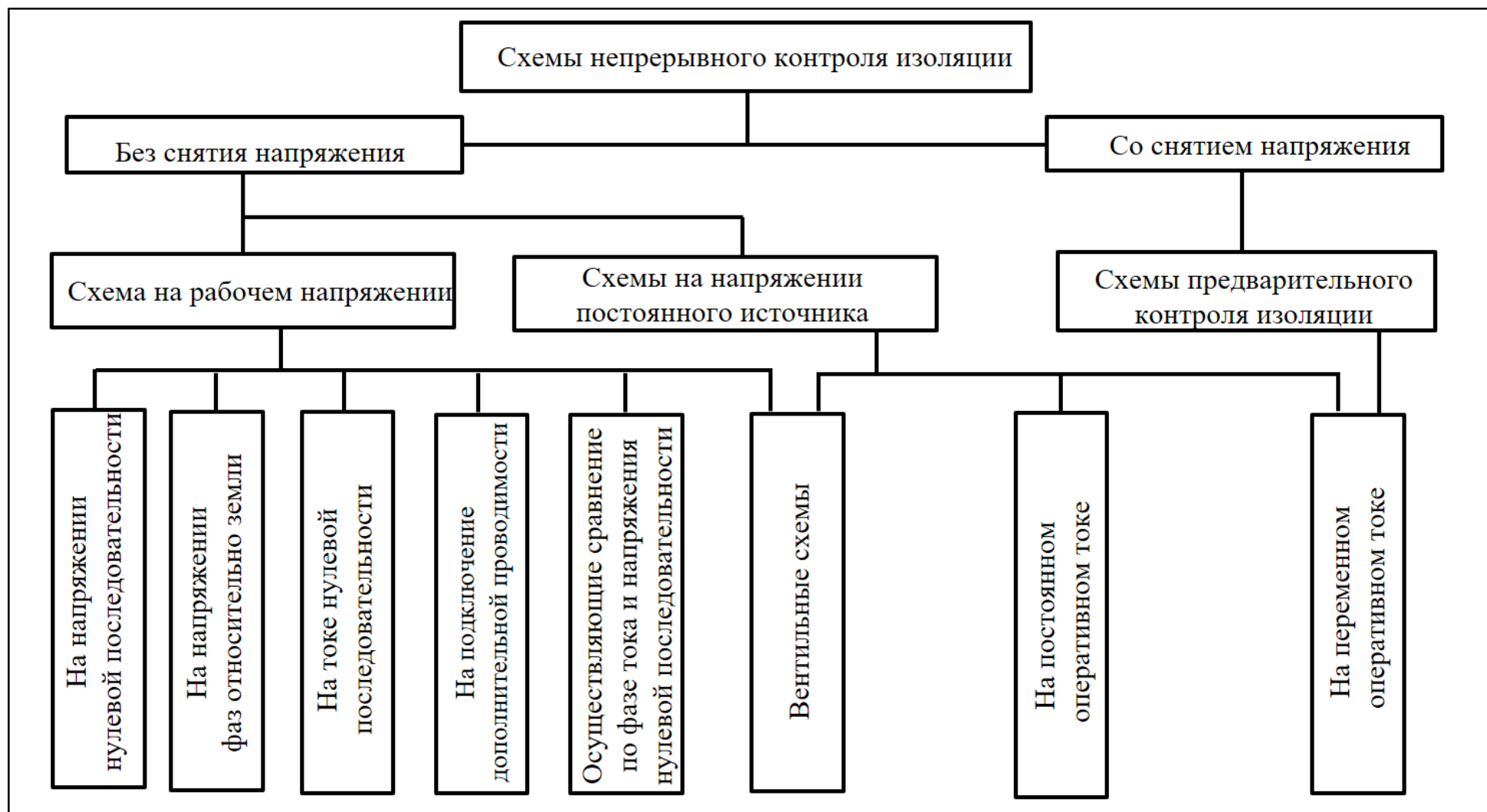


Рисунок 1.2 – Классификация схем непрерывного контроля изоляции

Непрерывный контроль сопротивления изоляции обеспечивает измерение активного сопротивления фаз сети относительно земли в течение всего времени работы ЭУ, автоматическую сигнализацию при снижении уровня сопротивления изоляции, отключение сети или отдельных участков при снижении сопротивления ниже допустимого уровня и в случае возникновения аварийного режима, связанного с пробоем изоляции на землю (однофазное замыкание).

К основным недостаткам устройств контроля изоляции (УКИ) автор относит следующие: устройства не определяют величину сопротивления, а только фиксируют факт его снижения, большинство не обладает селективностью, требуется установка дополнительного измерительного оборудования, использование принципа наложения постоянного (выпрямленного, модулированного) тока на сеть требует стабилизации параметров источника оперативного напряжения и т.д.

К особой группе УКИ относятся схемы, работающие при снятом с электрической сети напряжении, получающие питание от внешнего независимого источника тока. Как правило эти схемы применяются при предварительном контроле сопротивления изоляции (в блокировочных реле утечки (БРУ), встраиваемых в магнитные пускатели, или в системах опережающего отключения в автоматических выключателях). В современных УЗО типа АЗУР система предварительного контроля сопротивления изоляции является одним из блоков данных устройств защиты от тока утечки (УЗТУ).

Подробное описание схем дискретного и непрерывного контроля сопротивления изоляции в сетях с изолированной нейтралью приведено в [211].

Научная школа Читинского государственного университета (ЧитГУ), возглавляемая д.т.н. И.Ф. Суворовым и к.т.н. В.И. Петуровым, разработала классификационную структуру [114, 165] способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью, которая приведена на рисунке 1.3.

В соответствии с данной структурой существующие способы предложено разделить на группы по следующим пяти основным признакам.

1. По степени обеспечения безопасности.
2. По роду измерительного тока (напряжения).
3. По схемному и конструктивному решению
4. По типу измерения.
5. По выходным параметрам.

По степени информативности можно выделить способы, обеспечивающие:

- измерение суммарного сопротивления изоляции;
- измерение сопротивления изоляции отдельных фаз.

Кроме того, в зависимости от выходных параметров, измеряются:

- омическое сопротивление;
- полное сопротивление, с возможностью разделения на активную и реактивную составляющие;
- сопротивление току абсорбции;
- эквивалентное сопротивление.

В системе управления электробезопасностью (СУЭБ), разработанной под руководством д.т.н. А.В. Ляхомского [249, 261, 263, 278, 293], техническое обеспечение функций контроля и защиты возлагается на средства технического контроля электробезопасности (СрТКЭ), которые также являются важной составляющей системы технического диагностирования и контроля параметров и режимов работы электрооборудования (СТДК-ЭО) в составе электротехнических комплексов и систем электроснабжения.

Основные квалификационные признаки СрТКЭ приведены на рисунке 1.4.

Основное назначение таких средств заключается в сборе, обработке и представлении всей необходимой информации об уровне надежности и электробезопасности на основе анализа технического состояния электрооборудования и средств защитного отключения как диагностируемых элементов подземной электрической сети.

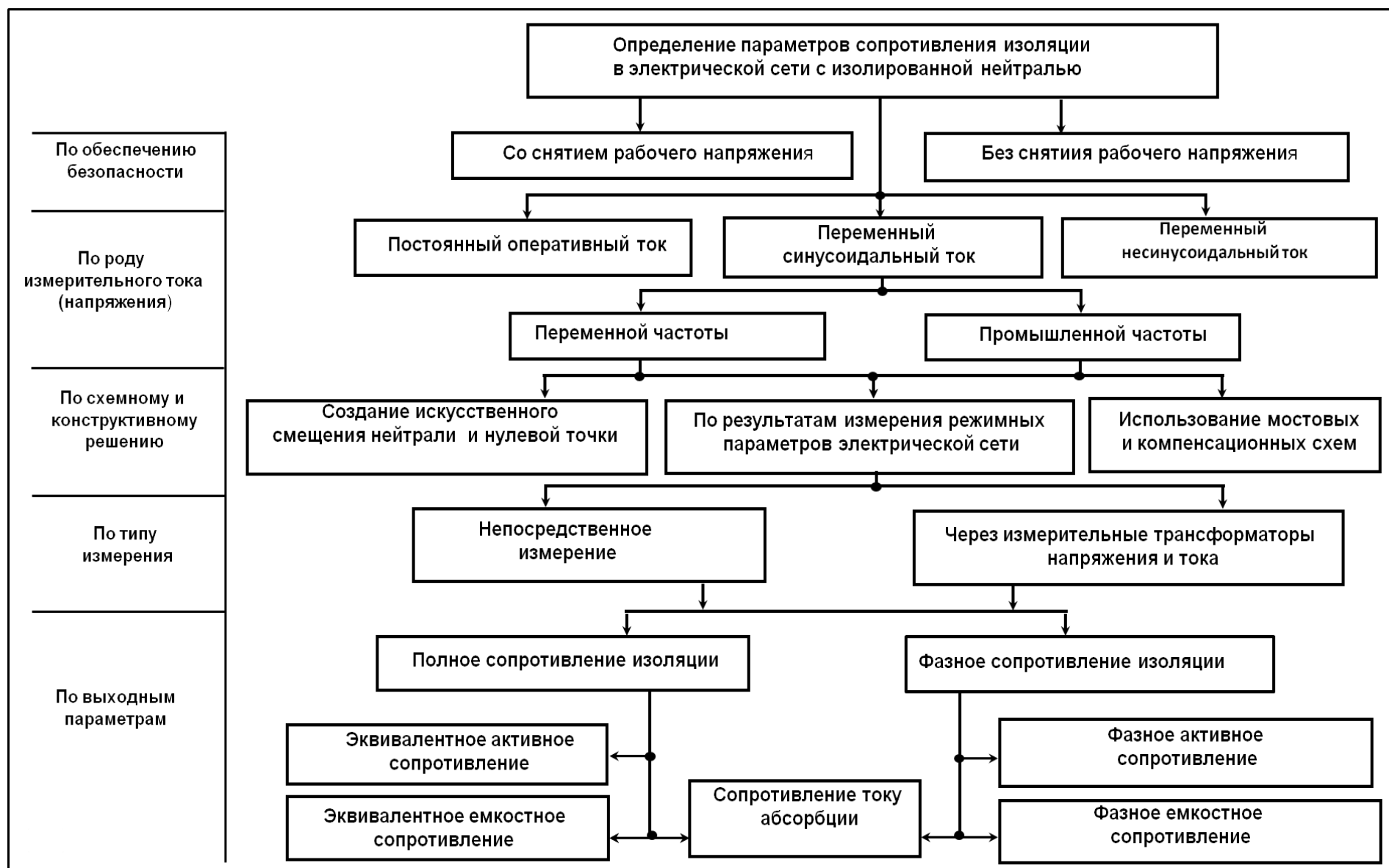


Рисунок 1.3 – Классификация способов определения параметров изоляции в сетях с изолированной нейтралью

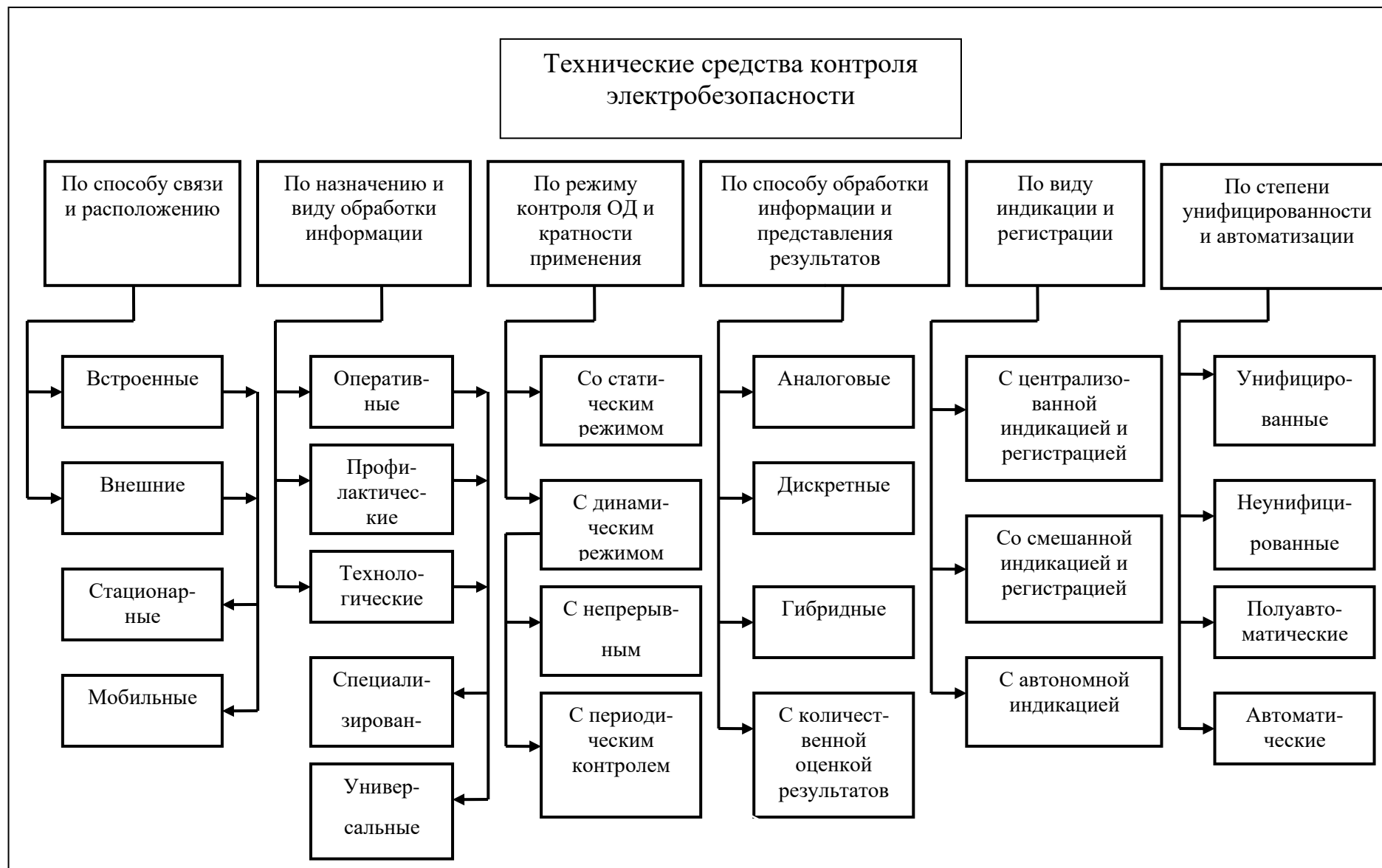


Рисунок 1.4 – Классификация средств технического контроля электробезопасности

Общая тенденция развития централизованных систем управления средствами контроля изоляции и защитного отключения обусловлена спецификой построения подземных электрических сетей, необходимостью оперативного вмешательства в технологический процесс с целью недопущения развития аварийных ситуаций.

Использование данной классификации позволяет систематизировать как существующие средства технического контроля состояния изоляции, так и вновь разрабатываемые на основе единого методологического подхода в реализации СУЭБ.

Одним из основных условий обеспечения требований по надежной и безопасной эксплуатации ЭТКС горных предприятий является использование защитных свойств изоляции путем поддержания высокого уровня сопротивления токам утечки.

Работа ЭТКС характеризуется не только параметрами режима, но и параметрами электрической сети.

К параметрам сети относятся полные сопротивления, активные и реактивные сопротивления, проводимости элементов, собственные взаимные проводимости, коэффициенты трансформации и коэффициенты усиления [216].

Основными параметрами трехфазных электрических сетей, определяющими степень надежности и безопасности, являются активные и емкостные составляющие сопротивления изоляции фаз. При этом, изоляция электрических сетей характеризуется сопротивлениями изоляции фаз сети относительно земли и сопротивлениями изоляции между фазами.

Параметры режима работы и параметры электрической сети связаны между собой зависимостями, определенными состоянием изоляции. Эта взаимосвязь позволяет по известным параметрам режима определять и контролировать сопротивление изоляции фаз сети относительно земли [40].

Эффективность контроля сопротивления изоляции определяется соответствием параметрам режима контролируемой сети. Наиболее значимым

параметрами являются фазные напряжения и напряжение между нейтралью трехфазной сети и землей.

Расчеты параметров, характеризующих режимы утечки тока через изоляцию, выполняются аналитическими, графоаналитическими и экспериментальными методами.

В основе аналитических методов положено представление комплексов симметричных фазных ЭДС при помощи операторов фазного сдвига, а параметры изоляции – соответствующими проводимостями отдельных фаз электрической сети. При этом электрическая сеть представляется схемой замещения нулевой последовательности или в виде схемы замещения в координатах $\alpha, \beta, 0$, позволяющей исследовать несимметрию внешних цепей изоляции при условии симметрии внутренних цепей источника ЭДС [65, 76, 121].

В основе графоаналитических методов расчета параметров изоляции положен метод круговых диаграмм, в соответствии с которым определяется геометрическое место конца вектора напряжения нулевой последовательности на диаграмме векторов ЭДС для различных режимов утечки тока или метод представления электрической сети направленным графом [216].

В основе экспериментального метода определения вектора напряжения между нейтралью трехфазной сети и землей положено приборное измерение линейных напряжений и напряжения фаз сети относительно земли при помощи вольтметров, а также измерением соответствующих углов фазовых сдвигов при помощи фазометров [40, 118, 216].

К настоящему времени разработано достаточно много методов определения параметров изоляции электроустановок, положенных в основу конструкций устройств контроля и защиты, получивших широкое распространение в различных областях силовой энергетики [13].

Одной из серьезных проблем является наличие емкостного тока утечки через изоляцию в протяженных линиях. Емкость изоляции сети относительно земли определяется геометрическими параметрами фазной изоляции,

диэлектрическими свойствами изоляционных материалов и внешними факторами воздействия (механические, химические, климатические и т.д.).

В настоящее время для защиты применяют, в комбинации с УЗО, устройство компенсации емкостных токов утечки, которое включается между нейтралью или искусственно создаваемой нейтральной точкой и землей, и настраивается в резонанс с емкостью сети. Как правило, это компенсирующий дроссель, индуктивность которого изменяется за счет переключения соответствующих отпаяк (неавтоматическое регулирование) или путем изменения насыщения его магнитопровода (автоматическое регулирование). Однако введение в нейтраль индуктивного сопротивления приводит к ухудшению защитных свойств изоляции в целом, т.к. появляется дополнительная цепь утечки. При низких значениях емкости изоляции и включенном компенсирующем дросселе ток утечки больше, чем при отключенном дросселе.

Опыт эксплуатации существующих УЗО показал, что эффект полной компенсации емкостной составляющей тока утечки при существующих схемных решениях не может быть достигнут, т.к. в допустимых для работы сети диапазонах изменения параметров изоляции и насыщения компенсирующего дросселя условия полного резонанса токов практически не достижимы [54].

Явление резонанса в электрических сетях напряжением до 1 кВ относится к мало изученным физическим процессам, поэтому в диссертации приводятся результаты некоторых исследований, позволяющие расширить представление о процессах, которые происходят в изоляции, в том числе с учетом низкочастотной поляризации в изоляционных материалах, и предложить возможные пути решения данной проблемы.

Исследованию влияния на изоляцию эксплуатационных факторов посвящено значительное количество научных работ, в которых рассмотрены многие важные аспекты, позволяющие на основании физических свойств и характеристик современных изоляционных материалов, установить степень их влияния на надежность и безопасность работы в электроустановках.

В большинстве научно-исследовательских работ при анализе и исследовании состояния изоляции рассматриваются схемы замещения с линейными и сосредоточенными емкостями и активными сопротивлениями (рисунок 1.5, а) [13,14, 57, 66, 67,85, 91,95, 101, 115, 278, 280, 285].

Теорией электрических цепей рассматривается обобщенная схема замещения трехфазной электрической сети в виде активного двухполюсника, пассивной частью которого является эквивалентный диэлектрик, схема замещения которого изображена на рисунке 1.5, б).

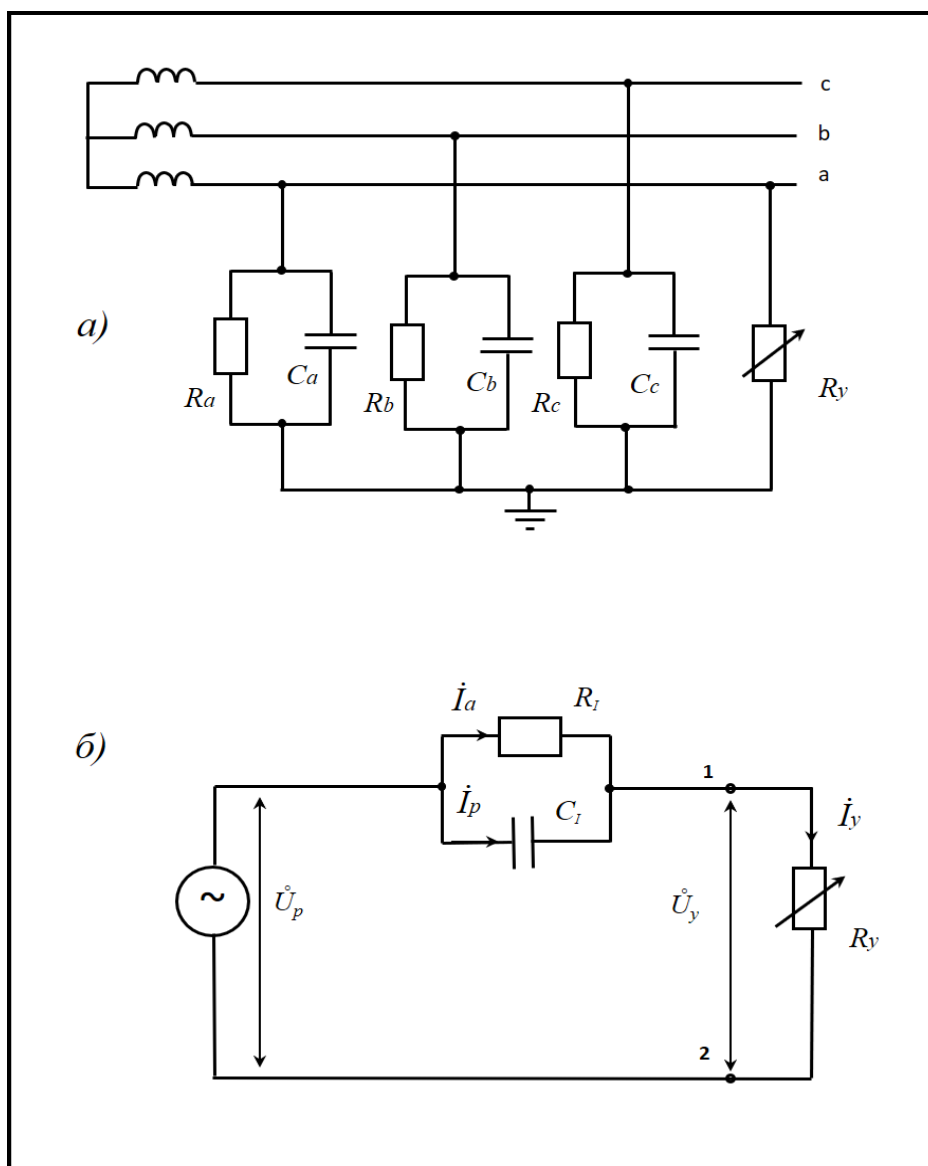


Рисунок 1.5 – Схема замещения электрической сети:

а) трехфазная, б) нулевой последовательности

Данная схема представляет собой эквивалентную схему замещения нулевой последовательности, для которой параметры изоляции рассчитываются по формулам:

$$R_I = \frac{R_a R_b R_c}{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}; \quad C_I = C_a + C_b + C_c, \quad (1.1)$$

фазные величины которых изменяются в пределах $R_I = 10,5 - 300$ кОм, $C_I = 0,1 - 3$ мкФ.

Следует отметить, что в дальнейшем, по мере усложнения поставленных задач, одновременно происходило и усложнение схемы путем ввода дополнительных цепей проводимости, изменения самого характера и физических свойств элементов, замещающих реальные объекты, а также параметров источника ЭДС.

Например, для учета устройств компенсации емкостного тока утечки вводилось дополнительное индуктивное сопротивление компенсирующего дросселя [57, 213]. Для учета влияния устройств защитного отключения (УЗО) варьировались схемы замещения фильтров (активно-индуктивные, активно-вентильные) [8, 57, 216]. Для анализа переходных процессов при различных видах коммутации задавались различные параметры режимов изменения ЭДС источника питания (например, при анализе режимов генерирования обратной ЭДС отключаемых электродвигателей) [8, 54, 271]. В ряде работ при исследовании режимов утечки выполнялась замена линейных элементов схемы замещения на нелинейные элементы (активные и емкостные сопротивления изоляции, сопротивления цепи утечки) [66, 100]. При изучении влияния низкочастотных поляризаций учитывались дополнительные цепи утечки тока через сопротивления абсорбции [91].

Электроизоляционные материалы, применяемые в электроустановках, представляют собой различного вида диэлектрики – вещества, обладающие низкой электропроводностью, обусловленной малым количеством свободных заряженных частиц (электронов и ионов).

В результате воздействия на изоляционный материал электрического напряжения в диэлектрике протекают процессы, связанные с его поляризацией (смещением электрических зарядов) и электрической проводимостью.

В физике диэлектриков [20, 78, 169] явления поляризации подразделяют на две основные группы:

- упругая поляризация, протекающая практически мгновенно под действием электрического поля, не сопровождающаяся рассеянием (потерями) энергии в диэлектрике (выделением теплоты);
- релаксационная поляризация, нарастающая и убывающая в течение некоторого промежутка времени и сопровождающаяся рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагреванием.

К упругой поляризации относятся электронная и ионная поляризации. Данные виды поляризации происходят практически мгновенно ($10^{-13} - 10^{-15}$ с) и исчезают при снятии с диэлектрика напряжения.

К релаксационной (низкочастотной) поляризации относится несколько видов поляризационных процессов, из которых следует отметить следующие: дипольная, электронно-релаксационная, упруго-дипольная поляризация, межслойная, остаточная и структурная поляризации.

Виды поляризации различаются по времени, необходимому для её установления, которое иногда называют временем релаксации диэлектрика.

В целом электропроводность диэлектриков характеризуется сквозными и абсорбционными токами утечки через изоляционный материал, а также перемещением в нем под действием электрического поля электронов, ионов и молионов [19, 78, 169].

В общем случае электрический ток в диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока, обусловленного переносом (движением) в электрическом поле различных носителей заряда, и тока абсорбции, представляющим собой ток смещения различных видов замедленной поляризации. При этом абсорбционные токи при переменном напряжении протекают в течение всего времени нахождения диэлектрика в электрическом поле.

Появление тока абсорбции обусловлено различными видами поляризационных процессов, происходящих в изоляции. Наиболее характерными являются: ионная, дипольная и низкочастотная поляризации [91, 169].

В современной практике электрических измерений об уровне сопротивления току абсорбции судят по коэффициенту абсорбции, который является дополнительным критерием, определяющим степень увлажнённости изоляции.

Изоляция считается достаточно сухой, если

$$k = \frac{R_{60}}{R_{15}} \geq 1,3, \quad (1.2)$$

где k – коэффициент абсорбции; R_{60} – показания мегомметра через 60 секунд после приложения напряжения; R_{15} – то же, через 15 секунд.

При работе диэлектрика под синусоидальным напряжением ток абсорбции также имеет синусоидальную форму и имеет две составляющие:

$$\text{– активную} \quad I'_{abc} = U \frac{S\omega^2\tau^2}{\omega^2\tau^2+1}; \quad (1.3)$$

$$\text{– реактивную} \quad I''_{abc} = U \frac{S\omega\tau}{\omega^2\tau^2+1}, \quad (1.4)$$

где s – начальная проводимость, соответствующая току абсорбции; ω – радианная частота переменного напряжения; τ – время затухания тока абсорбции или постоянная времени релаксации [19].

С учетом уравнений (1.3) и (1.4), выражения для сопротивления току абсорбции и соответствующей емкости [169]:

$$R_{IF} = \frac{\omega^2\tau^2+1}{\omega^2\tau^2(G+S)+S} = \frac{R_I R_{IA}}{R_I + R_{IA}}; \quad C_{IF} = \frac{C_I(\omega^2\tau^2+1)+S\tau}{\omega^2\tau^2+1} = C_I + C_{IA}, \quad (1.5)$$

где G – сквозная проводимость фазной изоляции.

Величину активных потерь при релаксационных явлениях можно охарактеризовать активным сопротивлением току абсорбции R_{abc} или его активной проводимостью G_{abc} .

Схема замещения фазной изоляции электрической сети при ее представлении эквивалентным диэлектриком приведена на рисунке 1.6 [91].

Следует отметить, что автор допустил неточность в исходной ветви абсорбционного тока и представленная схема может быть получена только при соответствующем преобразовании, приведенном в главе 2 (рисунок 2.7).

Активное сопротивление току абсорбции, учетом активной проводимости, определится по формуле:

$$R_{abc} = \frac{\omega^2 \tau^2 + 1}{S \omega^2 \tau^2} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S \omega^2 \tau^2}, \quad (1.6)$$

где S – начальная проводимость, соответствующая току абсорбции; ω – круговая частота переменного напряжения; τ – время затухания тока абсорбции или постоянная времени релаксации.

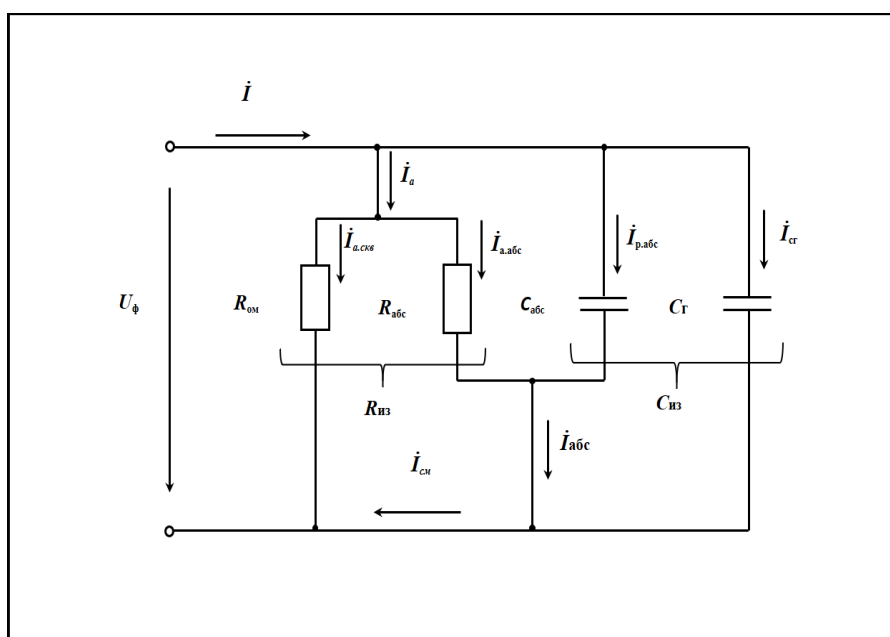


Рисунок 1.6 – Схема замещения фазной изоляции электрической сети при ее представлении эквивалентным диэлектриком

Для большинства изоляционных материалов начальная проводимость превосходит величину омической или сквозной проводимости $G = 1/R_{ом}$ [19,39].

Абсорбционная емкость фазной изоляции определится по формуле:

$$C_{abc} = \frac{S \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1}. \quad (1.7)$$

Для анализа состояния изоляции используется понятие тангенса угла диэлектрических потерь, который характеризует все потери энергии в изоляции и

представляет собой отношение полного активного тока I_a к полному реактивному току I_p [40, 41].

Тангенс угла δ определится по формуле:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{\omega^2\tau^2(G+S)+G}{\omega[S\tau^2+C_z(\omega^2\tau^2+1)]}. \quad (1.8)$$

В соответствии с векторной диаграммой (рисунок 1.3) определены углы отклонения векторов составляющих тока утечки от вектора напряжения источника питания.

Тангенс угла δ' характеризует потери энергии при релаксационных поляризациях. Его величину можно определить с учетом схемы замещения (рисунок 1.2) через величину тока абсорбции:

$$\operatorname{tg}\delta' = \frac{I_{a.abc}}{I_p} = \frac{S\omega\tau^2}{S\tau+C_z(\omega^2\tau^2+1)}. \quad (1.9)$$

Тангенс угла ψ определяет соотношение между активной и реактивной составляющими полного тока абсорбции:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{I_{a.abc}}{I_{p.abc}} = \omega\tau. \quad (1.10)$$

Угол α характеризует уровень сквозного тока утечки по сравнению с током абсорбции через эквивалентный диэлектрик:

$$\alpha = \arctg\delta - \arctg\delta'. \quad (1.11)$$

Таким образом, взаимосвязь между параметрами изоляции электрической сети можно выразить через соответствующие тангенсы углов диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{1}{\omega R_{из}(C_{abc}+C_z)} = \frac{1}{\omega R_{из}C_{из}}; \quad (1.12)$$

$$\operatorname{tg}\delta' = \frac{I_{a.abc}}{I_p} = \frac{1}{\omega R_{abc}(C_{abc}+C_z)} = \frac{1}{\omega R_{abc}C_{из}}; \quad (1.13)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{I_{a.abc}}{I_{p.abc}} = \frac{1}{\omega R_{abc}C_{abc}}. \quad (1.14)$$

Представленные электрические параметры позволяют практически определить реальные значения сопротивления изоляции, его составляющие, а также оценить потери энергии в результате сквозных утечек тока и релаксационных процессов поляризации диэлектрических материалов [91].

1.2.2. Исследования в области защитного отключения в подземных электрических сетях

Устройства защитного отключения (УЗО) относятся к наиболее эффективным средствам защиты электротехнического персонала, а также лиц, работающих в электроустановках. Выполняя функции оперативного контроля параметров изоляции электрической сети современные УЗО в сочетании с заземлением, занулением и трансформаторами, обеспечивающими гальваническую развязку или пониженное напряжение для цепей управления, позволяют в большинстве случаев поддерживать необходимый уровень электробезопасности.

В соответствии с [157] защитным отключением называется быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током.

Классификация и общие требования к устройствам защитного отключения изложены в [158].

Действие настоящего стандарта распространяется на устройства, предназначенные для автоматического отключения электроустановок при однофазном (однополюсном) прикосновении к частям, находящимся под напряжением, недопустимым для человека, и (или) при возникновении в электроустановке тока утечки (замыкания), превышающего заданные значения (в дальнейшем устройства защитного отключения – УЗО).

Классификация устройств защитного отключения по основным критериям действующего стандарта представлена на рисунке 1.7.

Классификация УЗО по видам конструктивного исполнения выполняется в соответствии с ГОСТ 18311-80.

Основные требования к устройствам защитного отключения, приведенные в [158], определяют их основные параметры функционального использования (ПФИ) для обеспечения требуемого уровня надежности и безопасности эксплуатации электроустановок.

К ПФИ УЗО в первую очередь следует отнести надежность, чувствительность, быстродействие, точность измерения контролируемых параметров, помехоустойчивость. При этом УЗО должны обладать стабильностью уставки и возможностью ее регулирования в широком диапазоне, селективностью действия, устойчивостью к механическим воздействиям, независимостью от изменений условий окружающей среды, малой стоимостью, габаритами и массой.

В случае использования УЗО в качестве единственного средства защиты или совместно с другими средствами, ток через человека, случайно прикоснувшегося токоведущим частям или корпусу электроустановки, находящейся под напряжением, соответствующее напряжение прикосновения и время действия тока в интервале до 1 с не превышали значений, установленных ГОСТ 12.1.038-82 [156].

При переходном процессе, возникающем в результате прикосновения человека к частям, находящимся под напряжением, под значением тока через человека подразумевают его эффективное значение за эквивалентное время переходного процесса.

В технических условиях на УЗО конкретных типов приводится перечень дестабилизирующих факторов, а также пределы отклонений уставок и времени срабатывания УЗО, возникающих под их воздействием.

Система специальных стандартов безопасности труда ССБТ также предусматривает требования по устойчивости УЗО к воздействию климатических и механических факторов внешней среды, виброустойчивости, пыле- и водо- и взрывозащите [158].

Общие требования безопасности к УЗО регламентируются согласно действующим ГОСТ 12.2.007.0-75 и ССБТ. ГОСТ 12.4.155-85. В настоящее время предложено несколько классификационных структур методов исследования параметров изоляции электрической сети и построения УЗО.

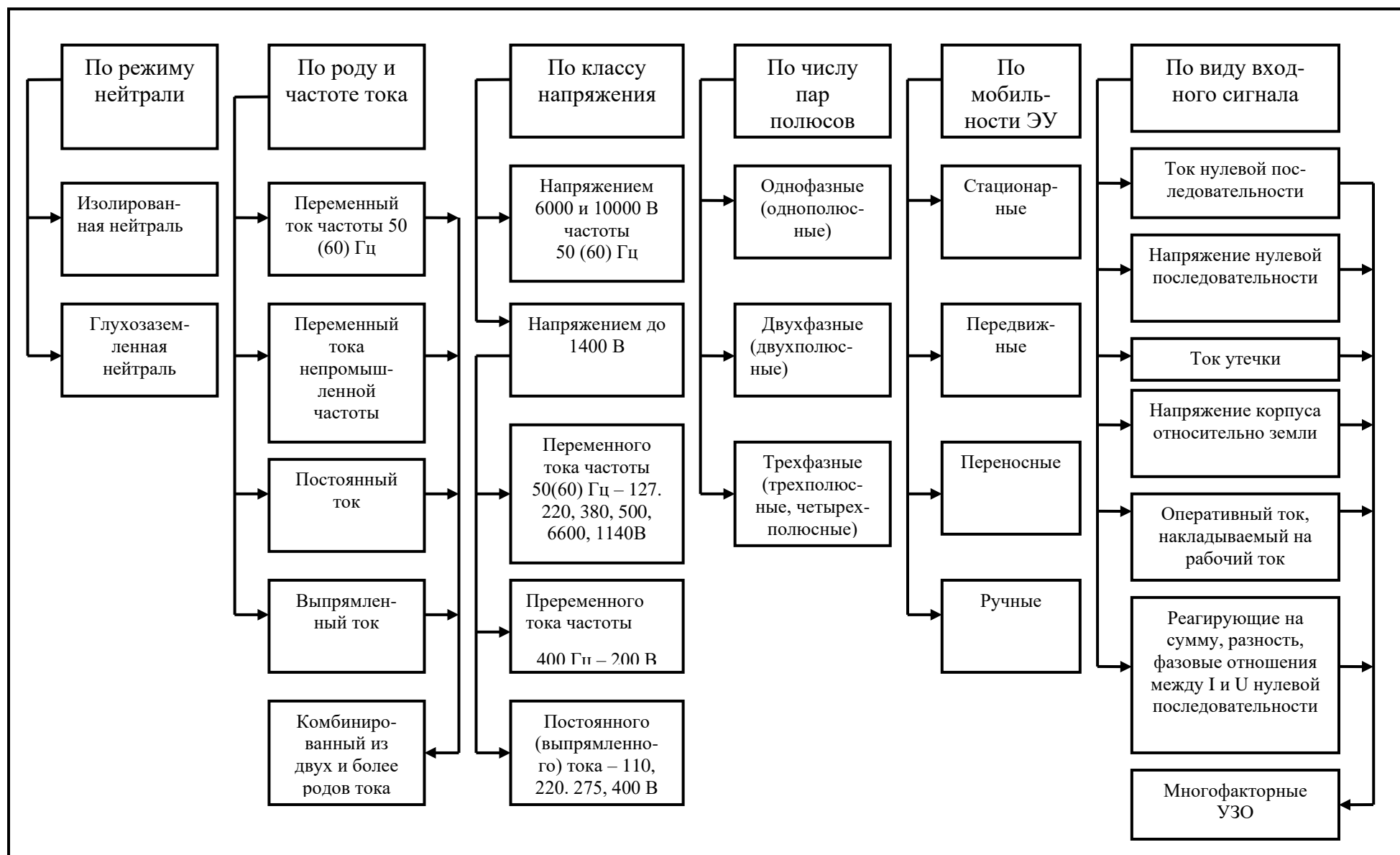


Рисунок 1.7 – Классификация устройств защитного отключения электроустановок (начало)

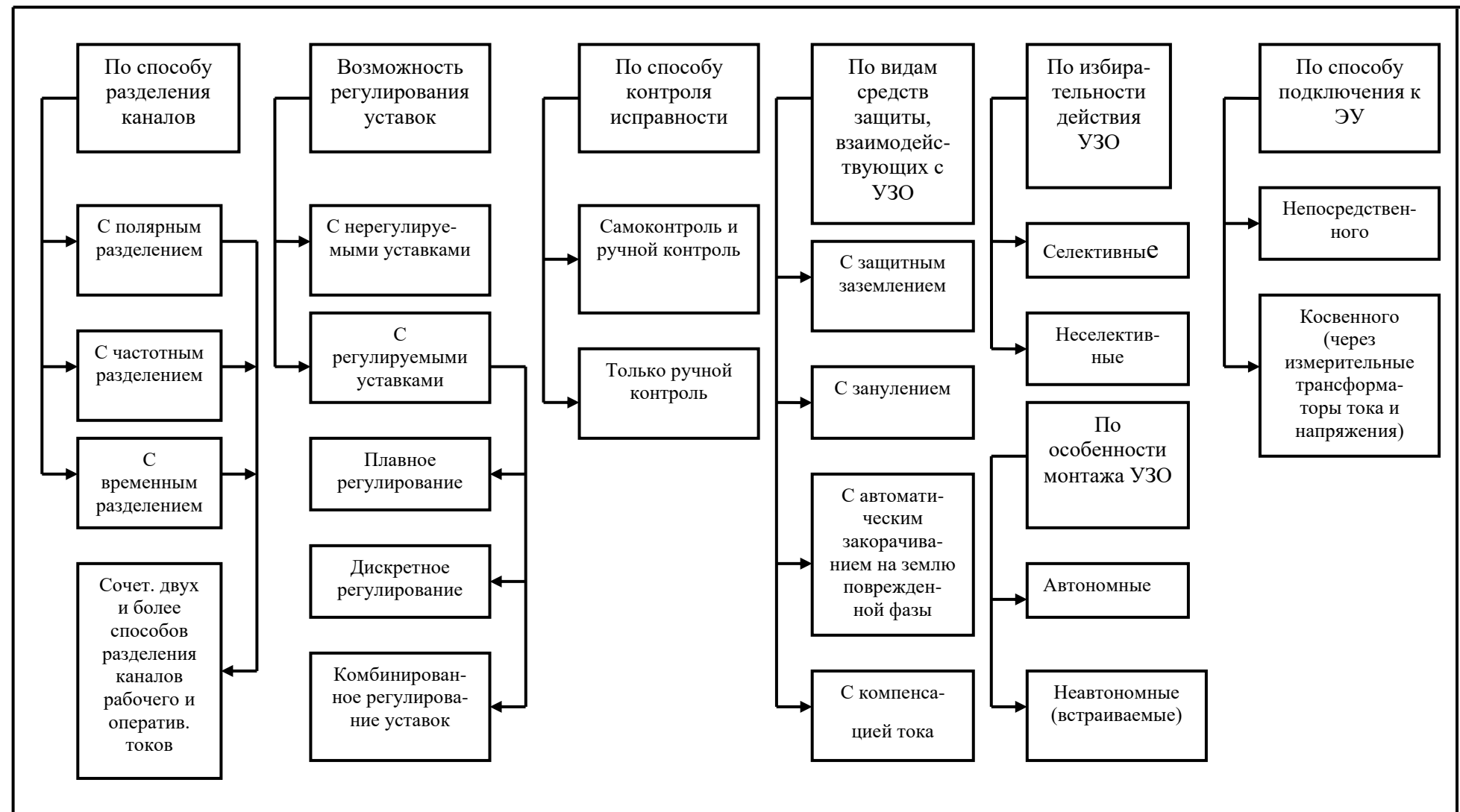


Рисунок 1.7 – Классификация устройств защитного отключения электроустановок (окончание)

Д.т.н. Щуцкий В.И в работах [196, 201, 206 – 210] рассматривает УЗО электроустановок в соответствии с областью применения. В связи с этим предлагает разделить их на следующие группы:

- стационарные напряжением выше 1 кВ;
- передвижные напряжением выше 1 кВ, питающиеся от стационарных или передвижных сетей с током однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) более 1 А;
- передвижные напряжением выше 1 кВ, питающиеся от стационарных или передвижных сетей с током ОЗЗ до 1 А;
- стационарные напряжением до 1 кВ;
- передвижные напряжением до 1 кВ, питающиеся как от передвижных, так и стационарных источников;
- передвижные напряжением до 1 кВ, питающиеся от передвижного источника с током ОЗЗ более 0,5 А;
- передвижные напряжением до 1 кВ с током на землю до 0,5 А.

Д.т.н. Бацезевым Ю.Г. и д.т.н. Немцевым Г.А. разработана наиболее полная соответствующая классификационная структура [9]. На основании обобщения опыта эксплуатации защит в специфических условиях горного производства авторы пришли к заключению, что анализ устойчивости их функционирования и надежности необходимо проводить с точки зрения принципов построения УЗО.

Предложенная классификация устройств защиты приведена на рисунке 1.8.

Согласно этой классификации общим отличительным признаком УЗО является их функциональное назначение, характеризующее основные способы предотвращения поражения человека электрическим током. Поэтому признаку устройства подразделяются на превентивную (предупредительную) защиту и оперативную защиту от утечек.

При всем многообразии предложенных технических решений, стендовые испытания, опыт практической эксплуатации позволил выявить как достоинства, так и недостатки многих устройств.

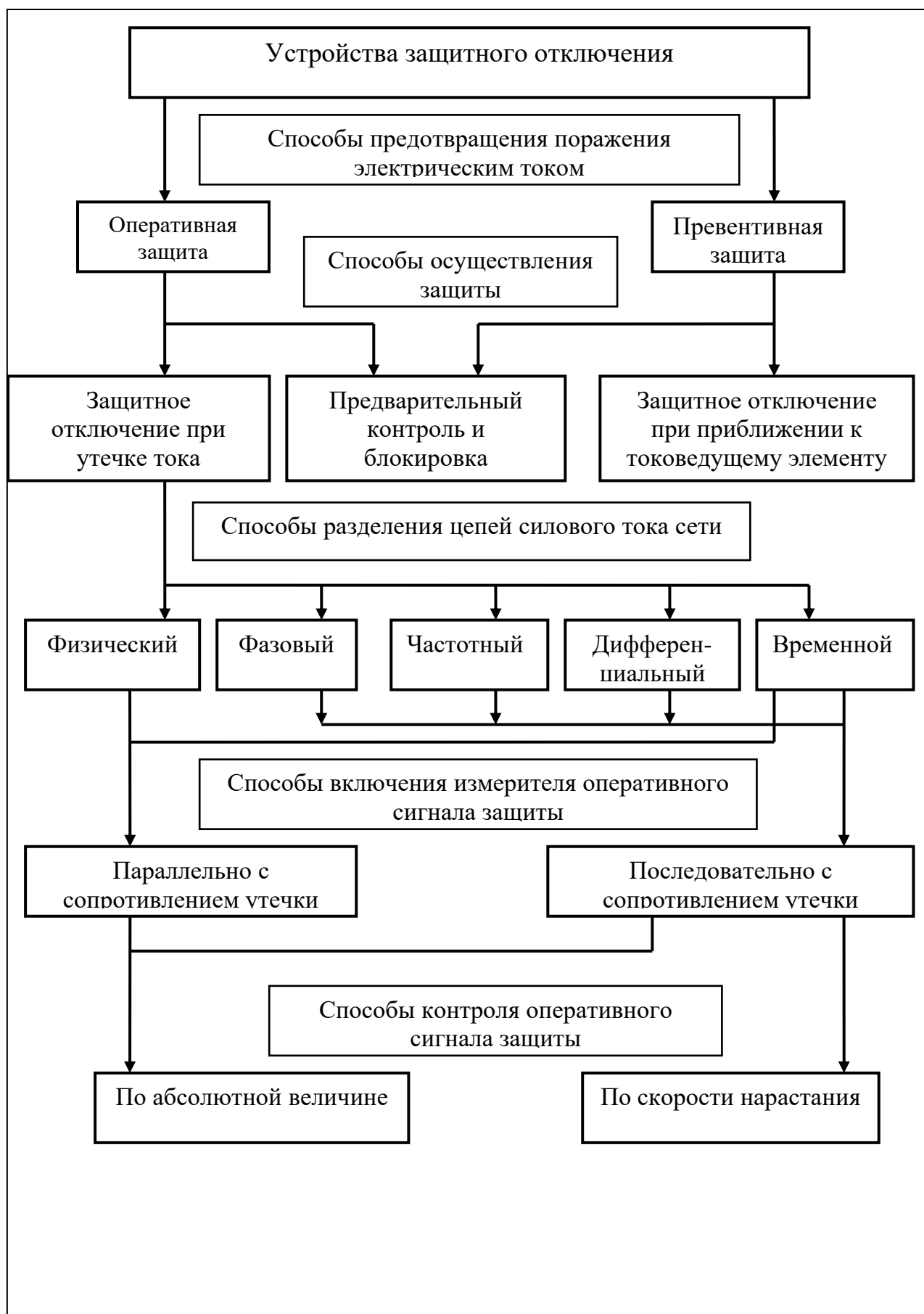


Рисунок 1.8 – Классификация принципов построения УЗО

Опыт эксплуатации показал их надежность и способность выполнять заложенные функции в специфических условиях подземных электрических сетей. Однако уже на стадии промышленного серийного производства выяснилось, используемые методы имеют ограничения области применения, диапазонов регулирования, чувствительности исполнительных элементов, сложности настройки и т.д., что в последующих попытках совершенствования УЗО не только не дало положительного эффекта, но и привело к функциональной избыточности, усложнению схемных решений, невозможности обеспечения эффективной работы в условиях динамически развивающихся подземных электрических сетей, повышения класса напряжения питания электроустановок от 380 В до 1140 В и выше, увеличения сечения кабельных линий и их протяженности, внедрения тиристорно-регулируемых электроприводов горных машин и механизмов, значительного роста единичной установленной мощности электродвигателей и нагрузки в целом и т.д.

Один из основателей и разработчиков серийных устройств защиты от токов утечки (УЗТУ) в шахтных электрических сетях д.т.н. Дзюбан В.С. в работе [54] указывал на сложность настройки компенсирующего дросселя компенсатора в резонанс с емкостью изоляции сети относительно земли, большой погрешности ($\Delta C_{\text{комп}} = \pm 0,25$ мкФ) и степени компенсации емкостного тока не превышающей 50 – 60% от его номинала. Положенный в основу блока защитного шунтирования фазочувствительный метод контроля напряжения в цепях утечки тока, разработанный к.т.н. Гончар Н.А. [47] экспериментально не подтвердил своей эффективности из-за низкой добротности исполнительного реле, сложности распознавания поврежденной фазы, необходимости установки параметров шунтов на низких сопротивлениях, соизмеримых с сопротивлением цепи утечки, возможность ложных срабатываний при режимах двухфазной утечки.

Проблеме компенсации емкостного тока утечки в подземных электрических сетях посвящены труды Антонова Ю.П., Васильева О.А., Дзюбана В.С., Колосюка В.П., Кононекно В.П., Ликаренко А.Г., Прудникова В.С., Сидоренко И.Т., Цапенко Е.Ф., Шкрабца Ф.П. и др. [1, 23, 54, 71, 72, 110, 121–

133, 184, 217, 233]. Научные разработки ученых нашли свою практическую реализацию в действующих устройствах защитного отключения (УЗО).

Принцип компенсации емкостного тока утечки, заключается в том, что компенсирующий дроссель УЗО включается между искусственной нейтральной точкой фильтра присоединения и землей. Его индуктивность подбирается в соответствии с условиями резонанса тока в получаемом LC -контуре компенсирующего дросселя Dp и суммарной емкости изоляции сети относительно земли. В реле утечки типа УАКИ регулирование осуществляется путем изменения числа витков компенсирующего дросселя переключением на отпайки 1, 2, 3 соответствующие емкости изоляции 0, до 0,5 и 0,5 – 1 мкФ/фазу (рисунок 1.9).

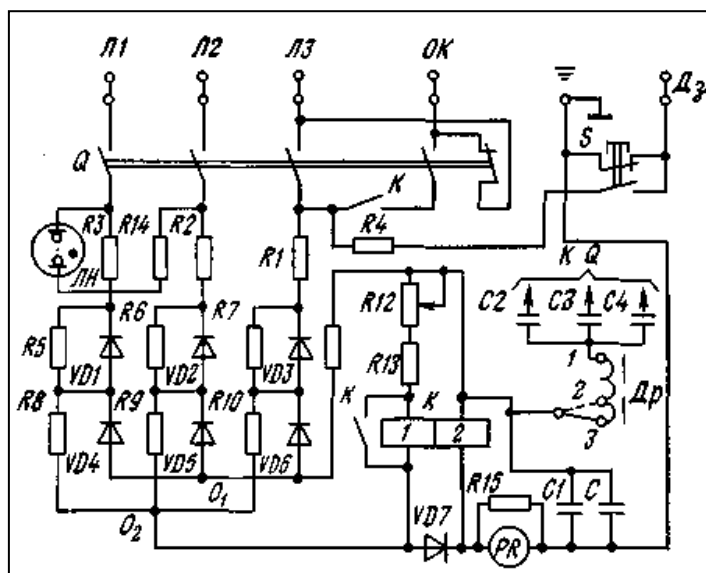


Рисунок 1.9 – Принципиальная электрическая схема УЗТУ типа УАКИ

В устройствах для автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки (АЗАК, АЗШ, АЗУР и др.), состоящих из управляемого постоянным током компенсирующего дросселя насыщения с положительной обратной связью, реализуется принцип компенсации за счет формирования управляющего сигнала, пропорционального изменяющемуся полному емкостному току сети, который подается на управляющую обмотку компенсирующего дросселя.

Реализация такого принципа компенсации выявило ряд проблем, связанных в надежностью функционирования УЗО, эффективностью компенсации в

широких пределах изменения емкости изоляции сети относительно земли, точности настройки компенсирующего дросселя насыщения, негативного влияния на работоспособность компенсатора активной составляющей тока утечки, наличие остаточной намагниченности дросселя, влияние температуры окружающей среды на работу элементов компенсатора и т.д.

Следует отметить, что указанные проблемы в основном были решены в процессе доводки опытных и серийных образцов современных УЗО, а также их модернизации в процессе эксплуатации.

Однако вопрос полной компенсации емкостных токов утечки остается открытым.

На суть проблемы в своих работах указал д.т.н. Цапенко Е.Ф. [187, 188]. Несмотря на определенную эффективность действия современных устройств компенсации емкостных токов, в основном при симметричных режимах утечки, имеет место поражение человека электрическим током. Основной причиной, по его мнению, является тот факт, что при прикосновении человека к фазе электрической сети происходит недокомпенсация емкостного тока из-за возникающей несимметрии фазных напряжений относительно земли и изменении условий резонанса в LC -контуре с компенсирующим дросселем насыщения.

Компенсирующий дроссель $L1$ современных УЗО (рисунок 1.10) включается между искусственной нулевой точкой индуктивного фильтра присоединения и землей и настраивается на резонанс полной емкостью изоляции сети относительно земли [129]. По сути, входным сигналом на управляющую обмотку компенсирующего дросселя является напряжение нулевой последовательности на обкладках балластной емкости резонансного контура KK в цепи емкостного фильтра присоединения и формируемое от выпрямителя и задающего LC -генератора оперативного синусоидального напряжения звуковой частоты. Получаемый сигнал, пропорциональный полному емкостному току утечки через усилитель $П2$ поступает на управляющую обмотку компенсирующего дросселя насыщения $L1$, что приводит к изменению его собственной индуктивности.

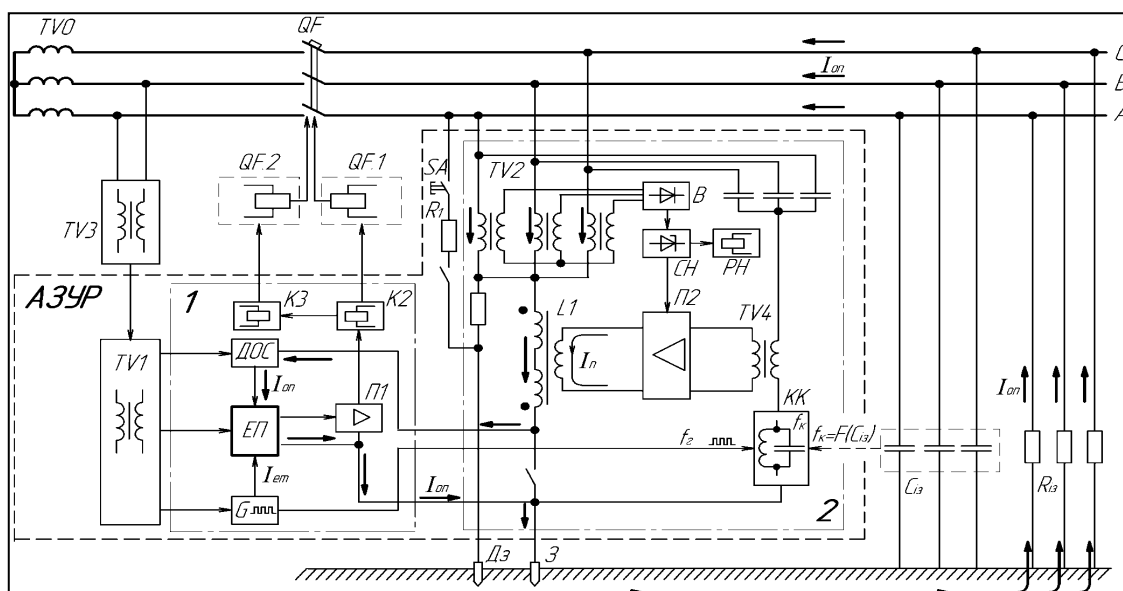


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема УЗО типа АЗУР

При этом, емкостной ток во вторичной обмотке трансформатора $TV1$ возрастает пропорционально росту суммарного емкостного тока электрической сети $C_{из}$. Для того, чтобы на вход усилителя управляющего сигнала $\Pi2$ не поступало напряжение смещения нейтрали при несимметричных режимах утечки предусматривается установка в нем дополнительного LC -фильтра.

Как показали исследования [267, 268, 273] в электрических сетях с изолированной нейтралью трансформатора имеют место случаи несимметрии сопротивления изоляции отдельных фаз (однофазная или двухфазная утечка тока), обусловленных деградационными процессами, механическими повреждениями или случаями однополюсного прикосновения человека к фазе сети. При этом, в несимметричных режимах утечки тока, особенно близких к критическим, условия резонанса в колебательных RC -контурах фазной изоляции не совпадают или полностью отсутствуют. Например, при однофазной утечке тока в фазе A условия полного резонанса в этой фазе при любой комбинации активного сопротивления изоляции приходятся на емкость 0,43 мкФ, в фазе B – на емкость 0,65 мкФ, а в фазе C – условия отсутствуют (см. рисунок 2.7). С учетом того, что компенсирующий дроссель УЗО настраивается в резонанс с полной емкостью изоляции, например 0,5 мкФ/фазу, то имеет место недокомпенсация в фазе A , перекомпенсация в фазе B и ее отсутствие в фазе C .

По сути, при несимметрии сопротивления изоляции имеет место неявно выраженный (квазирезонансный) режим, что приводит к недокомпенсации опасного емкостного тока.

При емкостях более 0,5 мкФ/фазу в электрических сетях напряжением до 1 кВ защитные свойства изоляции резко ухудшаются даже при условии ее высокого активного сопротивления. Это обусловлено тем, что в находящейся под напряжением электрической сети емкость фазной изоляции периодически перезаряжается и мощность заряда зависит от емкости условно протяженного конденсатора, которым можно представить изоляцию. В этом случае ток утечки через человека I_h определяется только величиной приложенного напряжения и емкостью изоляции:

$$I_h = \frac{3U_{\phi}\omega C}{\sqrt{1+9R_h^2\omega^2C^2}}, \quad (1.15)$$

где R_h – сопротивление тела человека; C – емкость фазы относительно земли; U_{ϕ} – фазное напряжение; ω – частота.

В настоящее время одним из эффективных методов снижения емкостной составляющей тока утечки является включение между фазами сети и землей индуктивного сопротивления, которое параллельно с емкостями отдельных фаз образует колебательный контур. В случае совпадения частоты источника напряжения и собственной частоты колебательного контура, при условии $\omega C = 1/(\omega L)$ возможен резонанс тока в данном контуре (рисунок 1.11). При этом резонансная частота контура определится соотношением $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

В отличие от классического резонанса токов, в реальных условиях условия полного резонанса встречаются редко. Это обусловлено целым рядом объективных причин, из которых следует отметить следующие.

1. Изоляция обладает как активным, так и емкостным сопротивлениями, которые в сочетании с параллельно подключаемой индуктивностью образуют нелинейный колебательный контур с собственной частотой.
2. Реальные сочетания активного, емкостного и индуктивного сопротивлений контура не всегда соответствуют условиям резонанса тока.

3. Введение дополнительного сопротивления утечки в цепь с колебательным контуром вносит свои ограничения в условия резонанса. При этом цепь утечки может быть также нелинейной или обладать собственным колебательным контуром, например состоящим из емкостного и активного сопротивления тела человека.

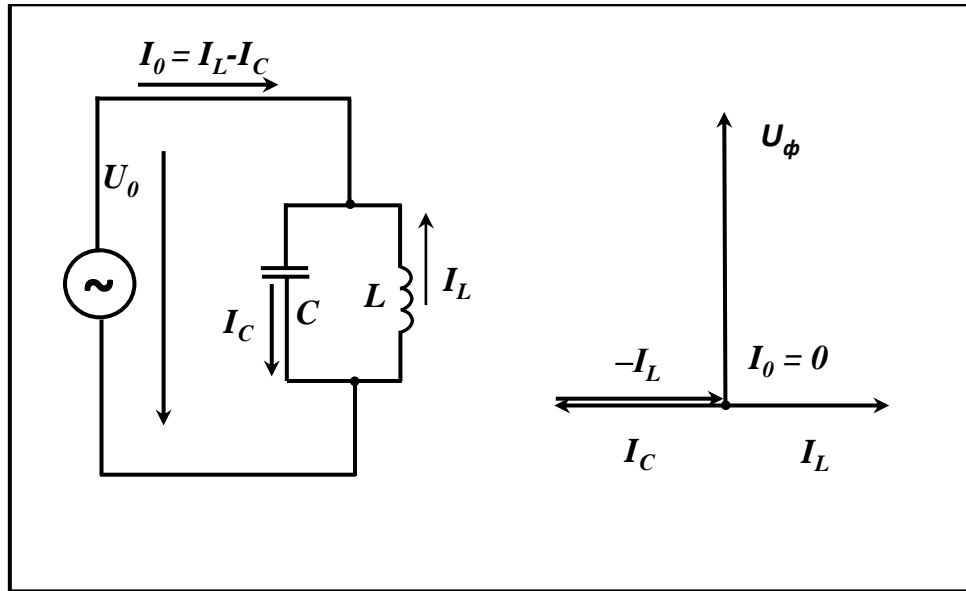


Рисунок 1.11 – Схема резонанса тока в LC -контуре

На рисунке 1.12 представлена схема замещения электрической сети, в которой имеется цепь утечки тока и векторная диаграмма, поясняющая общий принцип компенсации его емкостной составляющей.

В современных УЗО компенсатор емкостного тока утечки включается между искусственной нейтральной точкой, образованной ветвями фазных сопротивлений активно-индуктивного фильтра, соединенными в звезду и землей. В случае, если в УЗО реализован принцип наложения на контролируруемую сеть постоянного или оперативного выпрямленного напряжения, последовательно с индуктивным дросселем компенсатора дополнительно включается разделительная емкость [54].

Действующее значение тока утечки при включенном компенсаторе емкости определится по формуле:

$$I_y = U \sqrt{\frac{(g_{из} + g_k)^2 + (b_c - b_k)^2}{[1 + R_y(g_{из} + g_k)]^2 + R_y^2(b_c - b_k)^2}}, \quad (1.16)$$

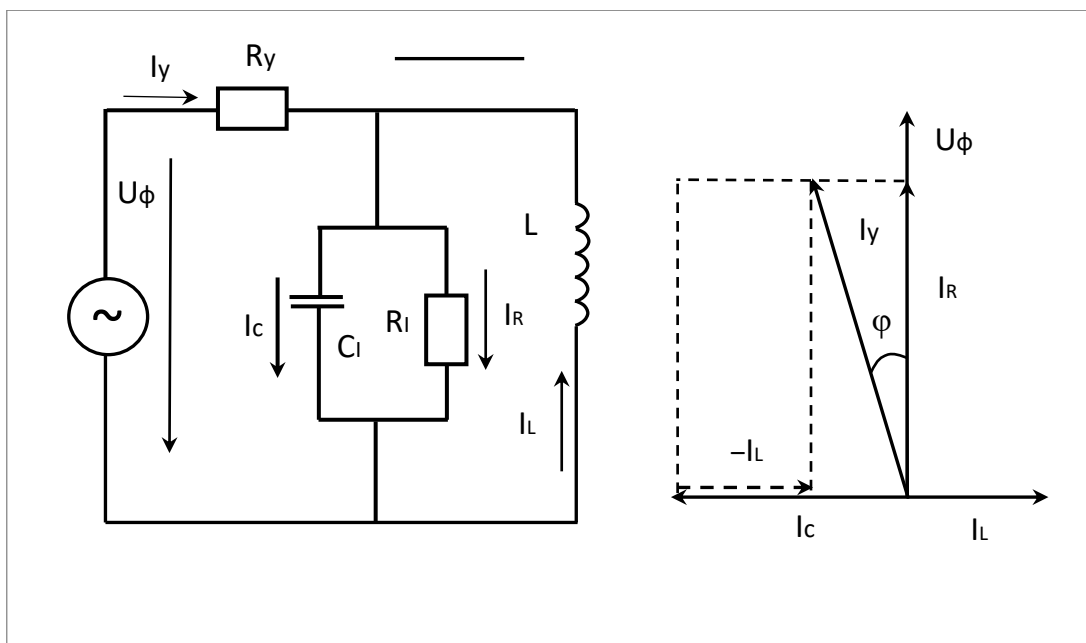


Рисунок 1.12 – Схема замещения электрической цепи и векторная диаграмма токов

где U – действующее значение фазного напряжения сети; $g_{из} = 1/R_{из}$; $b_c = 1/X_c$; $g_k = R_o/(R_o^2 + X_k^2)$; $b_k = X_k/(R_o^2 + X_k^2)$ – соответственно активная и емкостная проводимости изоляции фаз сети относительно земли, активная и индуктивная проводимости компенсатора; $X_k = X_d - X_p$; $X_d = \omega L_d$ – индуктивное сопротивление компенсатора току промышленной частоты; $X_p = 1/\omega C_p$; $X_c = 1/\omega C_c$ – сопротивления соответственно разделительного конденсатора и емкостей фаз сети относительно земли.

В случае применения компенсатора без потерь и бесконечно большого активного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли действующее значение установившегося тока однофазной утечки определится по формуле:

$$I_y = U \sqrt{R_y^2 + 1/[\omega^2(C_c - C_n)^2]}, \quad (1.17)$$

где C_n – емкость сети, на которую настроен компенсатор.

Условием полной компенсации емкостной составляющей является равенство емкостей $X_c = X_k$. Только в этом случае установившийся ток утечки будет равен нулю.

На рисунке 1.13 приведены зависимости тока утечки через сопротивление $R_y = 1$ кОм от эквивалентной емкости изоляции сети для трех уровней линейного

напряжения при отключенном (1, 2, 3) и включенном (4, 5, 6) компенсаторе емкости электрической сети, настроенном в резонанс с емкостью 0,5 мкФ/фазу. При этом активное сопротивление дросселя принималось равным значениям: $R_d = 0$ (зависимость 4), $R_d = 100$ Ом (зависимость 5), $R_d = 300$ Ом (зависимость 6) [54].

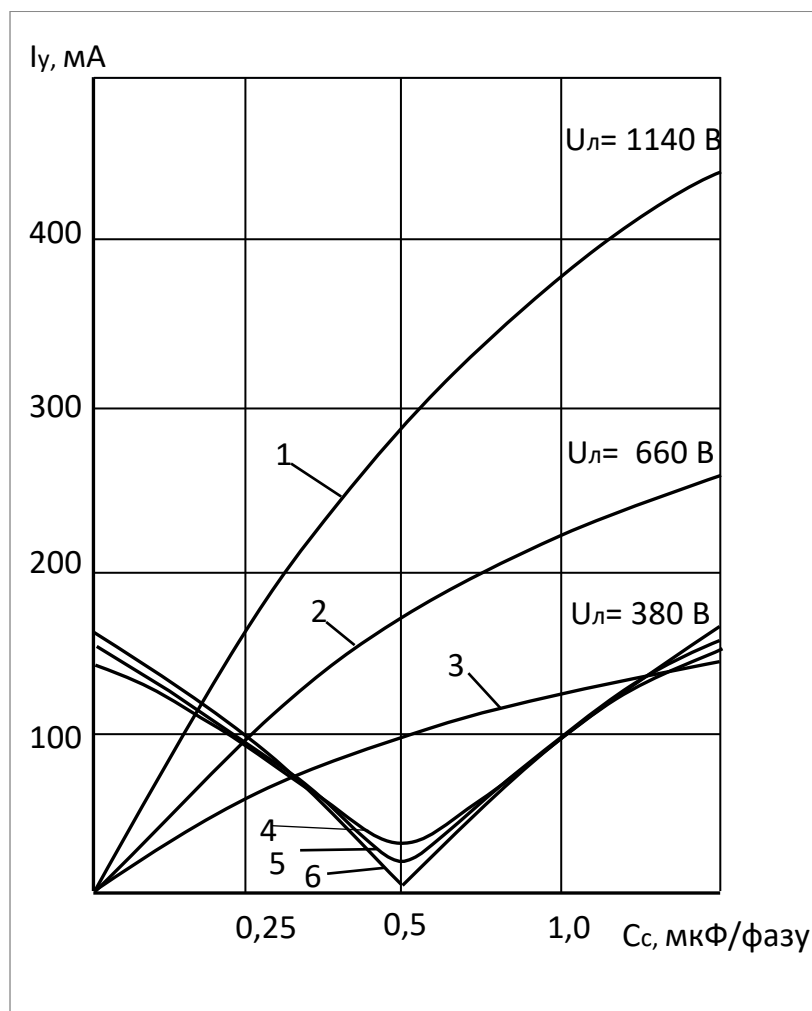


Рисунок 1.13 – Зависимости токов утечки от емкости изоляции сети

Анализ зависимостей показывает, что фиксированная индуктивность компенсирующего дросселя может обеспечить снижение уровня тока утечки до допустимых значений $I_y \leq 100$ мА в кратковременном режиме. Однако диапазон компенсации ограничен емкостью в пределах $\pm 0,25$ мкФ. При этом степень компенсации зависит от величины активного сопротивления фильтра. Потери в компенсирующих дросселях, разделительных конденсаторах и фильтрах не равны нулю.

Особенностью устройств компенсации емкостного тока утечки, реализованных в УЗТУ типа УАКИ, АЗАК, АСЗС, АЗШ, АЗУР, является нелинейная зависимость их выходного напряжения от емкости сети.

Компенсирующие дроссели насыщения УЗТУ имеют значительную мощность управления, что обуславливает применение в устройствах компенсации мощных выходных усилителей постоянного тока. Для достижения требуемой точности настройки компенсатора необходимо, чтобы ток в обмотке управления не зависел от изменения сопротивления этой обмотки, напряжения источника питания, температуры окружающей среды и параметров элементов устройства управления [54].

В диссертационной работе одной из решаемых научных задач является обоснование способа пофазной компенсации емкостной составляющей тока утечки и разработка устройства для его реализации.

1.2.3. Исследования влияния переходных процессов в подземных электрических сетях на электробезопасность

В процессе эксплуатации электроустановок в подземных электрических сетях возникают переходные процессы, характеризующиеся быстрыми и значительными изменениями параметров элементов системы электроснабжения во времени.

В электрических сетях горных предприятий переходные процессы возникают как при устойчивых, так и при неустойчивых повреждениях изоляции и токоведущих частей.

Одной из причин возникновения переходных процессов является появление несимметрии токов и напряжений в результате отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки, обрывов фаз, снижения сопротивления изоляции фаз сети относительно земли и пр.

Исследования и анализ переходных процессов в подземных электрических сетях являются одним из необходимых условий решения многих задач, возникающих в процессе эксплуатации шахтного электрооборудования. Эти

задачи связаны с исследованием электромагнитных переходных процессов, выбором принципов действия и настройки устройств контроля изоляции и защитного отключения, устройств релейной защиты и противоаварийного управления, разработкой мероприятий по обеспечению надежной и безопасной работы горных машин и электрооборудования.

Теоретические и экспериментальные исследования переходных процессов при несимметричных утечках тока через изоляцию в рудничных электрических сетях проводились многими научными школами. Наибольший вклад в решение этой проблемы внесли известные ученые: Бацезев Ю.Г. [7, 8], Безденежных А.Г. [13, 14], Вайлов А.М. [22], Гамазин С.И. [29 – 34], Георгиади В.Х. [35 – 38], Дзюбан В.С. [54 – 57], Ким К.Е. [66], Колосюк В.П. [70 – 74], Миндели Г.В. [96], Суворов И.Ф. [160 – 167], Фурцев М.Е. [176], Цапенко Е.Ф. [179, 184], Чабан [189, 190], Щуцкий В.И. [198 – 217] и др.

Исследователями выполнена большая работа по систематизации опытных данных, полученных при изучении электромагнитных и электромеханических переходных процессов в режимах генерирования обратной ЭДС электродвигателями при отключении от сети, а также при коротких замыканиях со стороны статорных цепей электродвигателей.

В целом переходный процесс за время от момента прикосновения до отключения сети УЗО можно рассматривать как квазистационарный [96]. Это обусловлено тем фактом, что длительность переходного процесса не превышает 8 – 10 мс, а последующий режим несимметричной утечки, отличающийся повышенными значениями фазных токов, можно считать условно установившимся до момента срабатывания УЗО.

На величину тока утечки существенное влияние оказывает уровень сопротивления изоляции фаз сети относительно земли и степень их несимметрии, определяемая предшествующим режимом утечки [9 – 12, 66, 165].

К.т.н. Фурцев М.Е. [176] одним из первых обратил внимание на тот факт, что режим генерирования обратной ЭДС асинхронным электродвигателем может представлять опасность электропоражения. Возникающий при этом переходный

процесс характеризуется величиной остаточного напряжения на зажимах статора и длительностью воздействия электрического тока.

С целью ограничения длительности опасного влияния обратной ЭДС автором предложено использовать в системе привода горных машин принудительное торможение вала двигателя в режиме противовключения с задержкой времени на размыкание силовых контактов автоматического выключателя и динамическое торможение посредством наложения постоянного тока на отключаемый участок сети после отпадания силовых контактов магнитных пускателей.

Проведенные автором исследования касались только технической стороны решения задачи ограничения длительности переходного процесса, как возможные средства повышения уровня электробезопасности. При этом не было дано количественной и качественной оценки воздействия тока переходного процесса на человека как объекта защиты.

Д.т.н. Колосюк В.П. исследовал влияние остаточного напряжения в шахтной электрической сети, обусловленного генерированием обратной ЭДС электродвигателями, на условия электробезопасности.

После отключения сети автоматическим выключателем в результате срабатывания УЗО, цепь утечки может получать питание от вращающихся по инерции электродвигателей [70, 71].

Зависимость тока утечки, обусловленного действием ЭДС, от времени выражается функцией:

$$I_{ym}(t) = I'_{ym} e^{-\delta t}, \quad (1.18)$$

где I'_{ym} – действующее значение тока утечки в момент отключения фидерного автомата; δ – показатель затухания тока утечки.

По данной формуле можно определить величину тока через человека для времени от момента срабатывания УЗО до момента начала отпадания силовых контактов магнитного пускателя $0,55U_{ном}$, если знать I'_{ym} и δ .

Д.т.н. Колосюк В.П. утверждает, что токи утечки через тело человека для моментов времени после отключения контактора весьма малы ввиду того «...что

после отпадания силовых контактов магнитных пускателей электрическая сеть ими разделяется на изолированные участки, емкость которых не велика, сопротивление не значительно..., а сама ЭДС существенно снижена» [70 – 72]. С другой стороны, автор подчеркивает важность и актуальность мероприятий по уменьшению действия ЭДС при разработке новых устройств защитного отключения.

К.т.н. Безденежных А.Г. отметил, что большой интерес представляют режимы, возникающие в цепи утечки тока при отключении двигателей [13, 14]. Утечка в 1 кОм создавалась в экспериментальной участковой сети, которая питалась от силового трансформатора мощностью 560 кВ·А и состояла из 100 м бронированного кабеля, 500 м гибкого кабеля, двух фидерных выключателей типа АФВ, пяти магнитных пускателей ПМВ и пяти электродвигателей (один из них типа КО мощностью 72 кВт). Были использованы реле утечки типа РУВ и УАКИ- 380.

В результате эксперимента было сделано заключение, что напряжение, поддерживаемое в электрической сети после ее отключения от понижающего трансформатора, представляет некоторую опасность в случае повреждения изоляции сети.

К.т.н. Тоцкий А.В. в своих работах [172, 173] разработал методику расчета напряжения в режиме генерирования электродвигателем обратной ЭДС (свободный индивидуальный выбег). Напряжение, генерируемое электродвигателем после отключения сети от источника питания, выражается в виде функции $U(t) = U_m e^{-\frac{t}{\tau}}$, где t – время затухания ЭДС; τ – постоянная времени, определяемая по таблице 1.1.

В первой серии экспериментов проводилось исследование процессов затухания напряжения при наличии емкости сети 0,015 мкФ/фазу, а во второй – при 0,5 мкФ/фазу.

Ввиду наличия в течение некоторого времени напряжения в сети существующие схемы электроснабжения не исключают возможности электротравм при их эксплуатации [173]. Тоцкий А.В. утверждает, что

устойчивый и надежный уровень электробезопасности в шахтных и рудничных низковольтных электрических сетях можно обеспечить комплексным применением комбинированных автоматических выключателей, автоматических короткозамыкателей и защиты от токов утечки.

Таблица 1.1 – Постоянные времени затухания электромагнитных переходных процессов для электрических машин.

Мощность двигателя, кВт		10	22	32	105
Постоянная времени τ при емкости кабельной сети	0,015 мкФ/фазу	0,5	0,85	1,1	1,35
	0,5 мкФ/фазу	0,65	0,96	1,19	1,46

К.т.н. Тонкошкур Л.С. и к.т.н. Голубков Ю.П. исследовали кратковременный режим утечки тока через сопротивление 1 кОм, имитирующее тело человека, в рудничных участковых сетях Кривбасса и некоторых шахт Урала, оснащенных средствами защитного отключения УАКИ-380, БЗП-1, АЗШ, САЗУ-БРУ-АПВ, АСЗС-У5 [46, 170].

На рисунке 1.14 приведена схема измерения тока утечки и обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями в рудничной участковой электрической сети с изолированной нейтралью. Величина кратковременного тока утечки в течение времени воздействия переходного процесса определилась по формуле:

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{2} T \sum_{i=1}^n I_{im}, \quad (1.19)$$

где Q – количество электричества, мА·с; T – период; I_{im} – амплитуда кратковременного тока утечки i -го периода.

Для практических расчетов мгновенное значение ЭДС от вращающихся по инерции двигателей принималось равным:

$$e = 0,95 U_{\phi m} e^{-\frac{t}{T_s}}, \quad (1.20)$$

где $U_{\phi m}$ – амплитудное значение фазного напряжения сети; T_s – электромагнитная постоянная времени затухания обратной ЭДС.

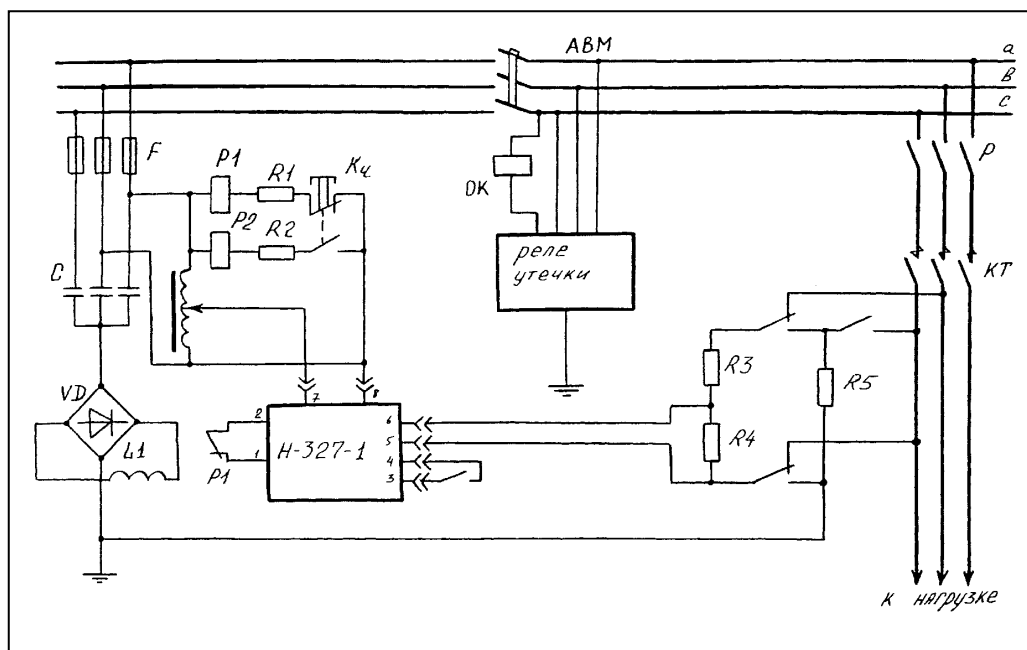


Рисунок 1.14 – Схема измерения кратковременного тока и обратной ЭДС при отключении электродвигателей в рудничной участковой электрической сети

Проведенные авторами исследования показали, что наибольшая величина тока утечки через сопротивление 1 кОм для сетей селективной защитой АСЗС-У5 составила 180 мА, в сетях с реле УАКИ или САЗУ ток утечки колебался в пределах 20 – 140 мА. Количество электричества в цепи утечки при генерировании обратной ЭДС асинхронных электродвигателей без учета времени срабатывания УЗО составило 5 – 44,7 мА·с.

Это позволило авторам сделать вывод о том, что при проектировании схем электроснабжения и разработке УЗТУ необходимо учитывать возможность генерации обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, а также вероятность возникновения резонанса затухающей ЭДС при применении защиты с компенсирующими дросселями [46].

Д.т.н. Суворов И.Ф. исследовал переходные процессы при возможном генерировании ЭДС отключаемыми электродвигателями в участковых электрических сетях горнорудных предприятий Забайкалья (драги, гидромониторные установки, карьерные подстанции буровых станков, участковые сети рудников и ГОКов) [159 – 167].

На рисунке 1.15 приведена схема включения осциллографа и гальванических элементов при проведении эксперимента.

В результате проведенных исследований было установлено, что условия протекания переходного процесса, определяется не только переходным процессом в сети до момента срабатывания УЗО, но и длительностью генерирования обратной ЭДС группового и индивидуального выбега электродвигателей. Суммарный эквивалентный ток утечки за 1 с при этом определится по формуле:

$$\Sigma I_{\Sigma} = \int_0^{t_{cp}} I_{\Sigma}(t_{cp}) dt + \int_0^{t_{cp}} I_{\Sigma}(t_{cp}) dt + \int_0^{t_{инд}} I_{\Sigma}(t_{инд}) dt, \quad (1.21)$$

где $I_{\Sigma}(t_{cp}), I_{\Sigma}(t_{cp}), I_{\Sigma}(t_{инд})$ – функции тока утечки через тело человека в течение времени срабатывания аппаратуры защитного отключения t_{cp} , времени генерирования ЭДС группой электродвигателей t_{cp} , времени генерирования ЭДС одним электродвигателем $t_{инд}$ соответственно.

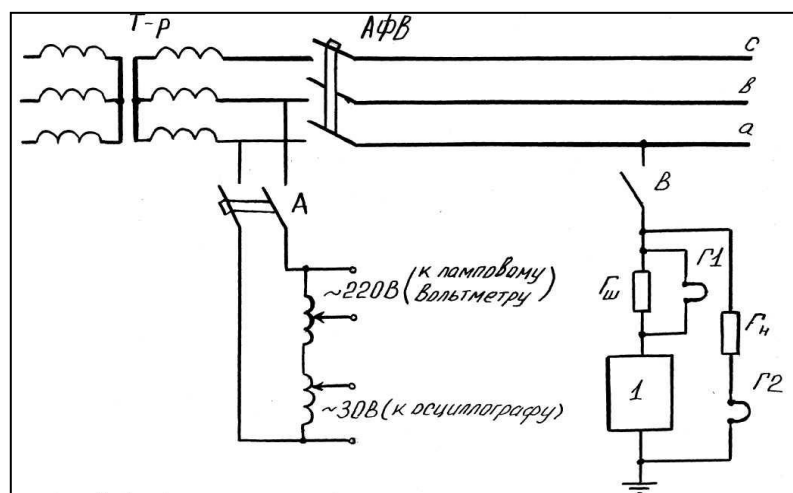


Рисунок 1.15 – Схема включения осциллографа, гальванометров и сопротивления человека: 1 – схема замещения тела человека; 2 – ЛАТР; 3 – шунт по току; G_n – шунт по напряжению; G_1 – G_2 – гальванометры; А – выключатель

Экспериментальные и аналитические исследования позволили автору высказать предположение, что при проведении ремонтно-монтажных и пусконаладочных работ возможно поражение обслуживающего персонала электрическим током при исправно действующем УЗО. Это обусловлено переходными процессами, возникающими в сети под действием обратной ЭДС

электродвигателей, работавших до момента отключения в вентиляторном режиме или режиме холостого хода.

Д.т.н. Щуцкий В.И., к.т.н. Прудников В.С. и к.т.н. Гайдашев В.И. получили зависимость тока от времени спада ЭДС электродвигателя мощностью 200 кВт ($T_f = 1,5$ с) в кабельной сети напряжением 660 В, при емкости изоляции сети относительно земли 1 мкФ/фазу [213]. При этом рассматривались различные варианты использования пусковой аппаратуры:

- с устройством автокомпенсации и катушкой электромагнитов на переменном токе;
- с устройством автокомпенсации и катушкой электромагнитов на постоянном токе;
- при отключенном устройстве автокомпенсации и не отключенной емкости сети.

Отмечая опасность поражения токами, генерируемыми электродвигателями в нестационарном режиме, авторы считают, что «...при использовании пусковой аппаратуры с катушками электромагнитов на постоянном токе устройство автокомпенсации не должно отключаться раньше аппаратов управления или должна быть предусмотрена задержка времени при отключении на время действия ЭДС» [213]. В противном случае количество электричества, протекающего через тело человека, может превысить допустимый уровень.

Д.т.н. Бацезев Ю.Г. исследовал кратковременные токи утечки в низковольтных сетях шахт и угольных обогатительных фабрик производственных объединений «Ростовуголь» и «Гуковуголь» [7 – 10].

На рисунке 1.16 приведена расчетная схема замещения шахтной электрической сети с устройством защитного отключения типа УАКИ-380 и группой асинхронных электродвигателей, присоединенных к питающей магистрали через магнитные пускатели типа ПМВИР.

В результате исследования переходных процессов автор сделал вывод о том, что несмотря на применяемые в настоящее время эффективные средства защитного отключения, контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостной составляющей тока утечки в шахтных низковольтных электрических

сетях возможно поражение человека электрическим током, величина и длительность которого обусловлена режимом генерирования обратной ЭДС электродвигателями, работающими в вентиляторном режиме или в режиме холостого хода. При этом человек длительное время будет находиться под опасным воздействием обратной ЭДС из-за возникающего эффекта приковывания к проводнику с током.

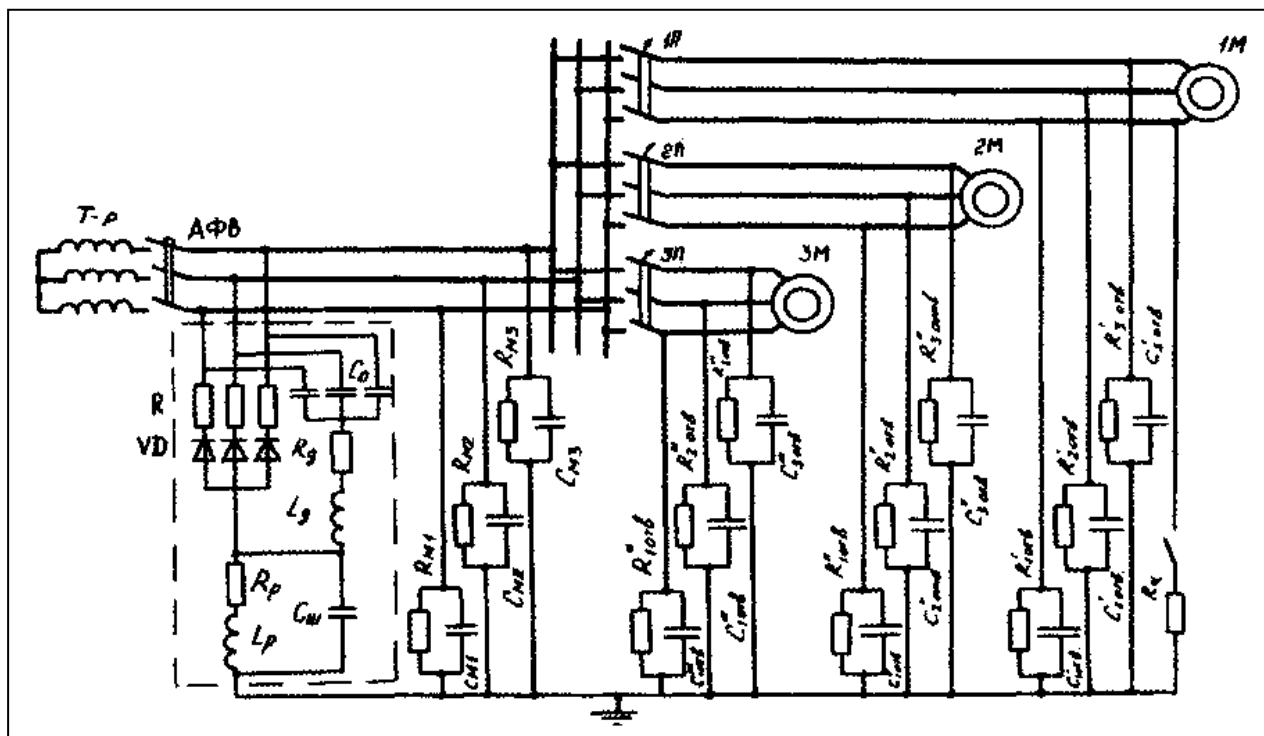


Рисунок 1.16 – Схема замещения шахтной участковой электрической сети

Аналитическое исследование переходных процессов в рудничных участковых электрических сетях, выполненное к.т.н. Кимом К.Е. [66] в результате математического моделирования, позволило ему сделать вывод о том, что в сетях, оборудованных УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения, независимо от режима эксплуатации сети, при низких уровнях параметров изоляции возрастание коэффициента несимметрии активных сопротивлений изоляции существенно влияет на условия электробезопасности. В сетях, оборудованных УЗО с $3VDR$ -фильтром присоединения, наличие оперативного выпрямленного тока, зависящего от величины сопротивления изоляции сети, вызывает несимметрию фазных напряжений.

Проведенный краткий анализ основных исследований переходных процессов в шахтных низковольтных сетях позволил сделать следующие выводы.

1. Среди специалистов нет единого мнения о степени влияния обратной ЭДС электродвигателей на условия электробезопасности. Большинство исследователей считает, что возможность поражения токами переходных процессов при генерировании электродвигателями обратной ЭДС необходимо учитывать при разработке рациональных схем электроснабжения и создании новых устройств защитного отключения.

2. Различие в оценке влияния переходных процессов на электробезопасность в низковольтных сетях горных предприятий в основном обусловлено различными методическими подходами к решению данной задачи и отсутствием единой научно обоснованной методики.

3. Сведения о количественных и качественных характеристиках опасности поражения человека электрическим током при генерировании обратной ЭДС выбега двигателями не обобщены и не систематизированы.

1.3. Обоснование цели и постановка задач диссертационного исследования

Общая характеристика проблемы обеспечения контроля изоляции и защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий, изучение состояния вопроса научных исследований позволили сделать следующие выводы.

1. Современные тенденции развития ЭТКС горных предприятий интенсивно развиваются в области увеличения производительности горных машин и механизмов, что приводит существенной к росту единичной мощности электродвигателей систем электроприводов, увеличению класса напряжения подземных участковых электрических сетей, увеличению протяженности кабельных линий распределительной сети. С учетом специфических условий эксплуатации все это обуславливает выполнения жестких требований к типу исполнения (уровень взрывозащиты, искробезопасность) горно-шахтного

электрооборудования и обеспечению высокого уровня электробезопасности при ведении горных работ.

2. Развитие систем частотно-регулируемого электропривода с асинхронными электродвигателями для управления приводами механизмов подачи очистных комбайнов, компрессорных станций, скребковых и ленточных конвейеров обуславливает необходимость обеспечения соответствующего качества электроэнергии за счет установки в ПЭС ГП токоограничивающих реакторов и фильтро-компенсирующих устройств и синус фильтров. При этом, в настоящее время ФКУ и СФ во взрывозащищенном исполнении для эксплуатации в ПКЭС находятся в научно-технической разработке и серийно не производятся. Вопросы обеспечения качества электроэнергии, спектрального состава гармонических составляющих напряжения и тока, оценка влияния преобразователей частоты на эффективность работы устройств контроля и защитного отключения и на опасность электротравматизма остаются открытыми.

3. Применение серийно выпускаемых устройств защиты от токов утечки в ПКЭС требует внимательного изучения и анализа эффективности их работы, проверки соответствия заданных производителем характеристик требованиям отраслевых правил безопасной эксплуатации и специальных стандартов безопасности труда. Необходима оценка возможности использования методов контроля изоляции, защитного отключения и компенсации емкостного тока утечки, положенных в основу принципа действия серийных УЗТУ с учетом повышения класса напряжения ПЭС ПЧ и ПКЭС до 3,3 – 6 кВ.

4. Актуальным представляется разработка средств контроля и ограничения режимов генерирования обратной ЭДС отключаемыми асинхронными электродвигателями, способов и средств пофазного контроля изоляции и пофазной компенсации на основе дальнейшего развития фазочувствительных методов, применяемых при построении средств защитного отключения, повышения эффективности защитного отключения на основе решения вопроса магнитной совместимости электронных блоков за счет

фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока в ветвях фильтров присоединения и цепи измерителя УЗТУ.

Таким образом, обоснование методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий является актуальной научной проблемой, решение которой позволяет обеспечить более высокий перспективный уровень развития теории и практики создания новых средств обеспечения безопасной эксплуатации горно-шахтного оборудования.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие задачи научного исследования.

1. Обоснование метода исследования режимов утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях горных предприятий. Разработка математической модели для анализа режимов утечки тока и синтез схем замещения подземной электрической сети.

2. Разработка имитационных моделей подземных электрических сетей промышленной частоты, позволяющих исследовать и установить закономерности изменения фазных напряжений и токов утечки при изменении параметров изоляции, с целью обоснования метода оценки степени опасности режимов утечки тока.

3. Разработка имитационных моделей подземных комбинированных электрических сетей, позволяющих установить и исследовать гармонический состав напряжения и токов утечки, генерируемых преобразователем частоты, и выполнить оценку степени их влияния на эффективность работы средств защитного отключения.

4. Исследование электромагнитных переходных процессов в подземной электрической сети при несимметричных режимах утечки тока через изоляцию и оценка их влияния на эффективность работы средств защитного отключения.

5. Обоснование методов и разработка средств пофазного контроля изоляции и компенсации емкостного тока утечки, контроля и ограничения режима генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями в подземных электрических сетях горных предприятий.

2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

2.1. Исходные положения

Анализ научных исследований режимов утечки тока через изоляцию электроустановок показал, что существует множество различных методов и средств решения поставленных задач в зависимости от конкретных условий, параметров и режимов работы электроустановок.

Выбор метода научных исследований должен иметь теоретическое обоснование на основе методологии, представляющей совокупность взаимосвязанных методов, позволяющих изучить исследуемые процессы в полном объеме.

Структура методологии научного исследования режимов утечки тока в подземных электрических сетях горных предприятий представляет собой следующие этапы.

1. Изучение процесса утечки тока на основе анализа физических явлений, обусловленных распределением и переносом электрических зарядов в изоляционном материале с учетом воздействия внешних факторов (влажность, механические нагрузки, температура окружающей среды и токоведущих элементов), а также деградиционных процессов, связанных с временным изменением изоляционных свойств диэлектриков в условиях различных видов низкочастотной поляризации.

2. Определение наиболее значимых факторов влияния на характер протекания процесса утечки тока в подземных электрических сетях с целью установления эмпирических зависимостей тока и напряжения фаз электрической сети относительно земли.

3. Аналитическое исследование на основе имитационного моделирования с учетом параметров и режимов работы электрооборудования подземных электрических сетей с целью установления, на основании совокупности полученных зависимостей, закономерностей изменения фазных

напряжений и токов в цепях утечки, а также обоснование критериев, позволяющих выполнить качественную и количественную оценку изучаемого процесса утечки тока.

4. Проведение экспериментальных исследований режимов утечки тока в подземных электрических сетях с целью верификации результатов аналитических исследований, разработки эмпирических зависимостей изменения тока утечки от параметров изоляции, режимов работы устройств защитного отключения, преобразователей частоты и электродвигателей для последующей выработки практических рекомендаций по использованию результатов научного исследования.

Целью данной главы является научное обоснование методов исследования несимметричных режимов утечки тока в подземных электрических сетях для реализации методов пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостных составляющих токов утечки и разработки на их основе средств защитного отключения, а также метода оценки степени опасности режимов утечки в шахтных подземных электрических сетях для последующей разработки практических рекомендаций по ограничению опасного воздействия тока на человека, с учетом переходных процессов при генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

Математическое моделирование режимов утечки позволяет с достаточной степенью точности аналитически описать любые процессы, в том числе такие сложные, как переходные процессы в электроустановках.

В условиях ограничений и допущений при моделировании электрических машин, преобразователей частоты, статических конденсаторов, фильтро-компенсирующих устройств и т.д. аналитические методы позволяют изменять параметры системы электроснабжения в достаточно широком диапазоне, выходя за рамки принятых на практике допусков, исследовать всевозможные предельные и критические ситуации.

Важным этапом в аналитическом исследовании является обоснование структуры и параметров математической модели, определение целей и задач

моделирования, условий и порядка проведения эксперимента, выбор методов обработки результатов исследований.

Основой математической модели для анализа режимов утечки тока, уровней напряжения и параметров изоляции электрической сети относительно земли является вывод и составление системы дифференциальных уравнений для обобщенной схемы замещения и оценки степени их воздействия на режимы утечки тока.

На основании алгоритма расчета параметров переходных процессов разработано соответствующее программное обеспечение, основу которого составляют численные методы интегрирования, применяемые для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих данную модель [194].

2.2. Обоснование метода исследования несимметричных режимов утечки тока в подземных электрических сетях

Современные схемы электроснабжения добычных и проходческих участков напряжением 380 – 1140 В промышленной частоты включают в себя: силовые трансформаторы передвижных участковых трансформаторных подстанций (ПУТП) мощностью до 2500 кВ·А; автоматические выключатели серий АФВ, АВВ и АВДО; устройства контроля изоляции и защитного отключения (УЗО) типа УАКИ, АЗАК, САЗУ, АЗУР; магистральные бронированные и полугибкие кабели марки ПВШЭ, ЭВТ, ВВБбГ, ВБбШв, ВСТШв и др.; распределительные пункты низкого напряжения (РП-НН), формируемые из магнитных пускателей серий ПВИ, ПВИТ, ПЭШ(Р), ПВВ или станций управления типа СУВ, СУВК, СУВЛ, КУУВМ, КСМ и др.; гибкие кабели ответвлений марки КГЭШ, КГпЭНШ, КОГРЭШ, КГТЭКШ, КГЭС и др., передающие электроэнергию к электрическим машинам и механизмам.

В качестве примера схемы электроснабжения добычного участка на рисунке 2.1 приведена однолинейная схема замещения подземной электрической сети промышленной частоты.

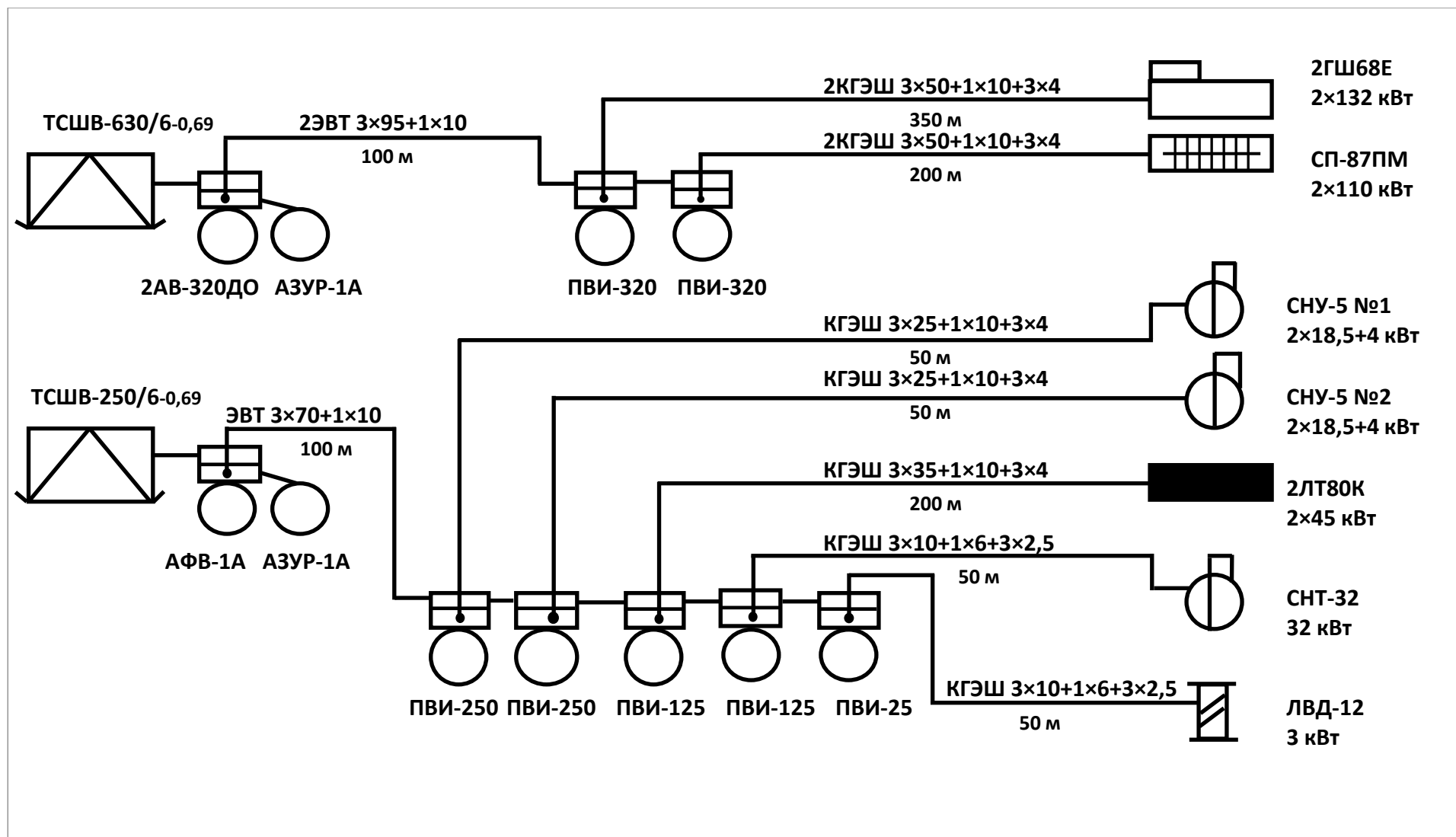


Рисунок 2.1 – Схема электроснабжения участка шахты

В составе очистного механизированного комплекса 2КМТ установлено следующее оборудование: комбайн 2ГШ68; скребковый конвейер СП87ПМ; ленточный телескопический конвейер 2ЛТ80К; две маслостанции СНУ-5 № 1 и СНУ-5 № 2; насос орошения СНТ-32; маневровая лебедка ЛВД-12. Распределение электроэнергии осуществляется от двух передвижных трансформаторных подстанций с трансформаторами ТСШВ мощностью 630 и 250 кВ·А напряжением 6000/660 В через автоматические выключатели АВ-320ДО и АФВ-1 по магистральным кабелям марки ЭВТ до двух РП-НН и далее через магнитные пускатели серии ПВИ по гибким кабелям марки КГЭШ непосредственно к электроустановкам. Общий контроль сопротивления изоляции и защитное отключение осуществляется УЗТУ типа АЗУР.

Для моделирования несимметричных режимов принята схема замещения цепей утечки тока, характерная для подземной участковой электрической сети напряжением до 1140 В (рисунок 2.2).

Рассмотрим основные элементы схемы замещения электрической сети для анализа режимов утечки тока.

Источником ЭДС является вторичная обмотка силового трансформатора ПУПП 6000/1140 В. Для исследования переходных процессов после срабатывания УЗО источником является генерируемая отключаемым асинхронным электродвигателем в электрическую сеть обратная ЭДС.

Многие авторы при решении задач, связанных с вопросами контроля режимов утечки, в своих исследованиях использовали различные варианты схем замещения параметров изоляции электрической сети относительно земли [8, 42, 66, 77, 71, 178, 180]. Изоляция кабельной сети характеризуется активным сопротивлением, определяемым качеством изоляционного материала по всей длине линии и сосредоточенным сопротивлением, являющимся результатом механических повреждений, старения, увлажнения и т.д., емкость изоляции относительно земли определяется в основном протяженностью электрически связанных линий и сечением кабелей [201, 212]

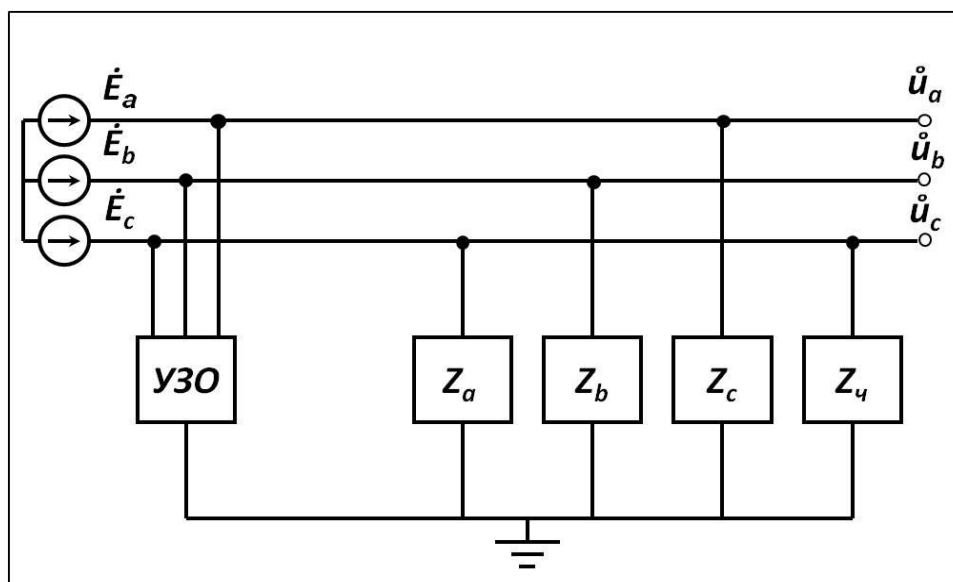


Рисунок 2.2 – Схема замещения цепей утечки тока в шахтной участковой электрической сети

В процессе работы участка величины сопротивлений и емкости изоляции изменяются с зависимости от последовательности подачи (снятия) питания на отдельные электроустановки, осуществляемой в соответствии с протоколом запуска (останова).

Полные сопротивления изоляции фаз (Z_a , Z_b , Z_c) принимаются сосредоточенными параметрами, составляющие которых изменяются в следующих диапазонах: активная – $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу, емкостная – $C_I = 0,1 - 1,0$ мкФ/фазу. Составляющие сопротивления цепи утечки тока через схему замещения тела человека (Z_q): сопротивление внутренних органов $R_v = 1$ кОм, сопротивление кожных покровов $R_k = 0,5 - 3,5$ кОм, емкость кожных покровов $C_k = 0,3 - 1$ мкФ. При напряжении 380 – 1140 В допустимо упрощение $Z_q \approx R_v = R_k = 1$ кОм, т.к. уже при напряжении более 40 В утрачиваются защитные свойства кожных покровов человека [7, 8, 66].

Устройство защитного отключения (УЗО) представлено в виде схемы замещения активно-индуктивного ($3RL$ -) или, как вариант, активно-вентильного ($3VDR$ -) фильтра подключения к электрической сети (рисунок 2.3, а, б) [55]. УЗО задается параметрами активно-вентильного фильтра $R_{FA} = R_{FB} = R_{FC} = 15$ кОм, сопротивления $R_{PN} = 1$ кОм и индуктивности $L_{PN} = 8$ Гн цепи измерителя. Для

УЗО с активно-индуктивной схемой присоединения принимаются параметры фильтра $R_{FA} = R_{FB} = R_{FC} = 0,3 \text{ кОм}$, $L_{FA} = L_{FB} = L_{FC} = 75 \text{ Гн}$, сопротивление и индуктивность цепи измерителя соответственно $R_0 = 3,9 \text{ кОм}$, $L_0 = 8 \text{ Гн}$.

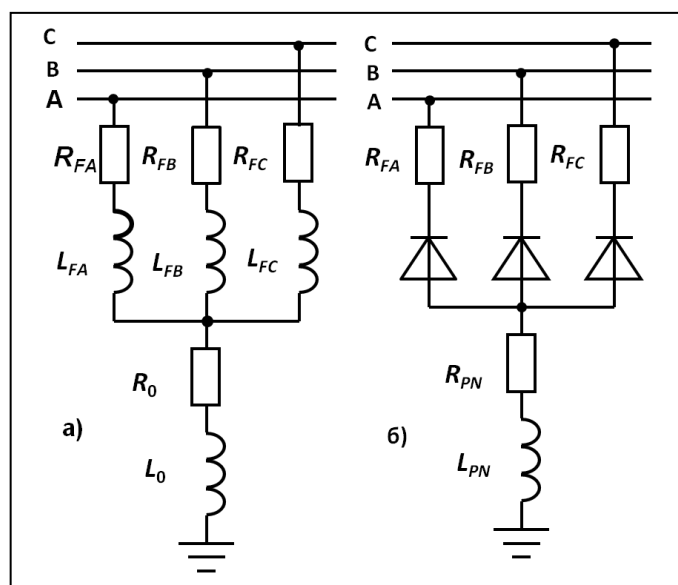


Рисунок 2.3 – Эквивалентные схемы замещения фильтров присоединения УЗО:

а) активно-индуктивный, б) активно-вентильный

На рисунке 2.4 приведена схема замещения УЗО с 3VDR-фильтром присоединения к электрической сети и устройством компенсации емкостного тока утечки. В настоящее время широко применяется способ автоматической компенсации емкостного тока утечки на основе подстройки индуктивности компенсатора в резонанс с емкостью изоляции электрической сети относительно земли. С целью оценки влияния компенсатора на эффективность работы УЗО приняты следующие параметры:

- при настройке дросселя на $0,5 \text{ мкФ/фазу}$ – $R_{PN} = 1 \text{ кОм}$, $R_0 = 3,9 \text{ кОм}$,
 $C_0 = 1 \text{ мкФ}$, $C_{sh} = 20 \text{ мкФ}$, $R_g = 300 \text{ Ом}$, $L_g = 18 \text{ Гн}$;
- при настройке дросселя на 1 мкФ/фазу – $R_{PN} = 1 \text{ кОм}$, $R_0 = 3,9 \text{ кОм}$, $C_0 = 1 \text{ мкФ}$,
 $C_{sh} = 20 \text{ мкФ}$, $R_g = 200 \text{ Ом}$, $L_g = 8 \text{ Гн}$.

Анализ результатов исследований, проведенный в главе 1, показал, что учет параметров УЗО в схеме замещения электрических цепей утечки значительно усложняет математическую модель. Важным фактором является то, что введение

в схему замещения узла искусственного смещения нейтрали и дополнительной цепи утечки через УЗО приводит к заметному (на 15 – 20%) возрастанию тока утечки через изоляцию (особенно при активно-вентильном фильтре присоединения к электрической сети).

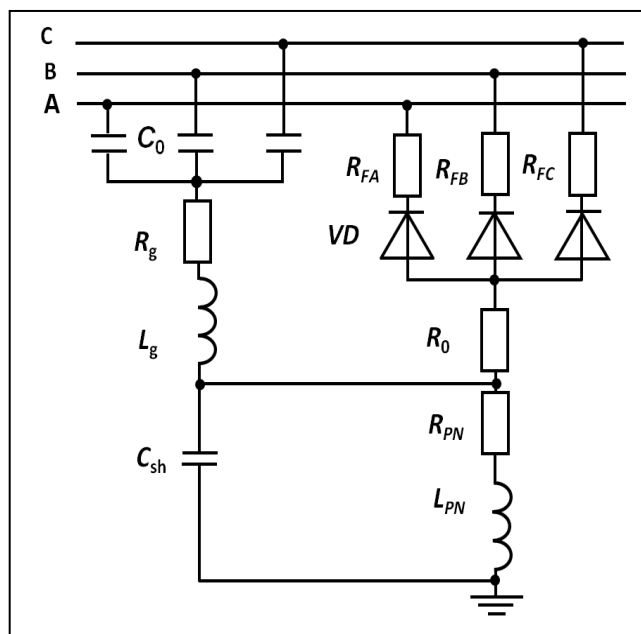


Рисунок 2.4 – Схема замещения УЗО с активно-вентильным фильтром и устройством компенсации емкостного тока утечки

В несимметричных режимах, который сопровождается соответствующей несимметрией фазных напряжений относительно земли, непосредственное влияние параметров УЗО на качественную оценку показателей утечки тока незначительно. Количественные показатели токов утечки в несимметричных режимах на напряжениях 380 и 660 В достаточно известны для схем замещения нулевой последовательности [7, 8, 66, 165].

При всём многообразии схемных решений наиболее распространенными являются схемы замещения нулевой последовательности, приведенные на рисунке 2.5, а, б. При этом схема (а) представляет собой схему замещения нулевой последовательности, для которой параметры изоляции эквивалентируются по формулам (1.2). Для данной схемы замещения параметры

фазной изоляции изменяются в пределах: $R = 3,5 - 300$ кОм/фазу, $C = 0,03 - 1,5$ мкФ/фазу.

Схема замещения фазной изоляции (рисунок 2.5, б) линейными сосредоточенными емкостями и активными сопротивлениями позволяет более точно описать процессы, происходящие в электрической сети в несимметричных режимах утечки тока.

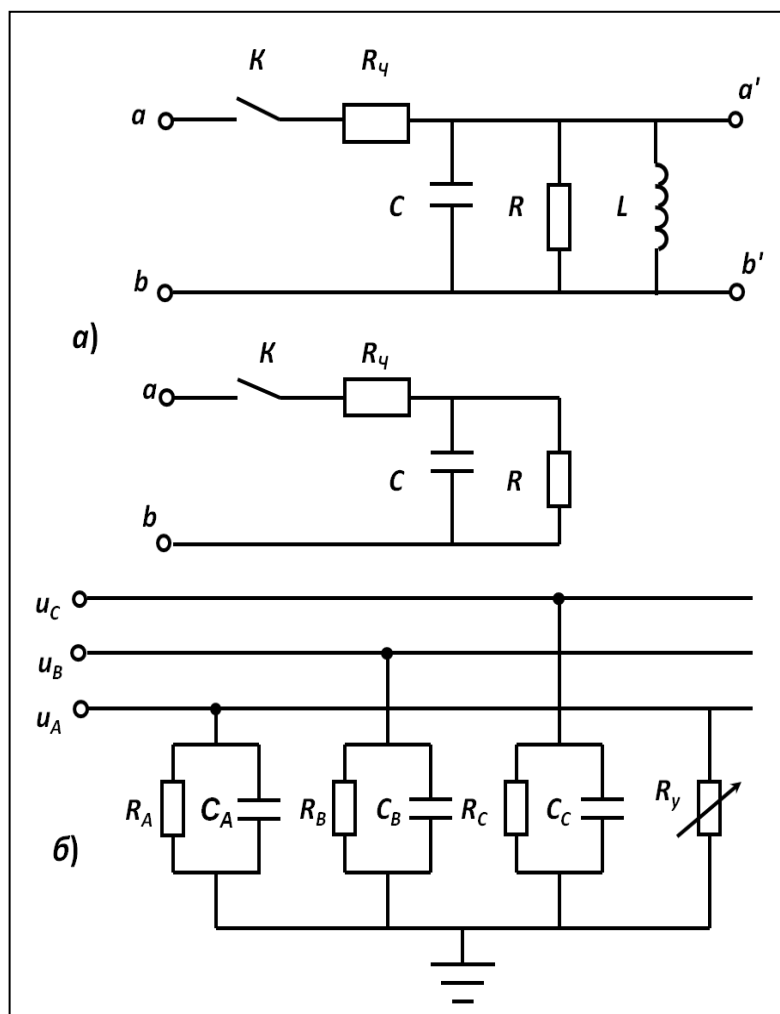


Рисунок 2.5 – Схемы замещения сопротивления изоляции электрической сети

Сопротивление изоляции электрической сети относительно земли представляется активным R_I и емкостным $X_I = 1/(\omega C_I)$ сопротивлениями в виде сосредоточенных параметров и задаются в пределах $R_I = 10,5 - 300$ кОм и $C_I = 0,1 - 3$ мкФ.

С учетом того, что исследуемые режимы утечки тока через фазную изоляцию относятся к переходным процессам во время срабатывания УЗО, то при

моделировании целесообразно представить их в виде постоянных времени затухания электромагнитных колебаний в RC -контурах:

$$X_{IA} = \frac{1}{\omega_0 C_A}, \quad X_{IB} = \frac{1}{\omega_0 C_B}, \quad X_{IC} = \frac{1}{\omega_0 C_C}; \quad (2.1)$$

$$T_{IA} = \frac{X_{IA}}{R_{IA}}, \quad T_{IB} = \frac{X_{IB}}{R_{IB}}, \quad T_C = \frac{X_{IC}}{R_{IC}}, \quad (2.2)$$

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 контурах изоляции сети; ω_0 – радианная промышленная частота.

При моделировании процесса утечки тока через схему замещения тела человека (рисунок 2.6) в случае учета его параметров в виде активных сопротивлений внутренних органов R_B и кожных покровов R_K , а также емкости кожи C_K ($X_{CK} = 1/(\omega C_K)$) выполним следующие преобразования.

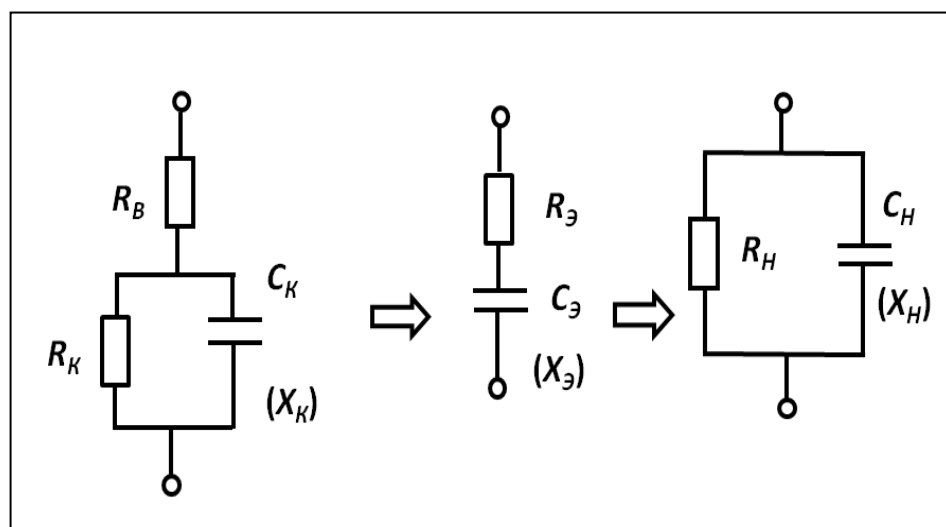


Рисунок 2.6 – Преобразование схемы замещения тела человека

Эквивалентные сопротивления для схемы замещения параметров тела человека определяются из выражений:

$$R_{\mathcal{E}} = R_B + \frac{R_K X_{CK}^2}{X_{CK}^2 + R_K}; \quad X_{\mathcal{E}} = \frac{X_{CK} R_K^2}{R_K^2 + X_{CK}^2}. \quad (2.3)$$

С учетом обратного преобразования цепочки $R_{\mathcal{E}} C_{\mathcal{E}}$ составляющие полного сопротивления тела человека:

$$R_H = \frac{X_{\mathcal{E}}^2 + R_{\mathcal{E}}^2}{R_{\mathcal{E}}}, \quad X_H = \frac{X_{\mathcal{E}}^2 + R_{\mathcal{E}}^2}{X_{\mathcal{E}}}. \quad (2.4)$$

Тогда сопротивление фазы сети, в которой произошло однополюсное прикосновение к токоведущей части электрической сети, определится по формулам:

$$R_{IH} = \frac{R_I R_H}{R_I + R_H}; \quad X_{IH} = \frac{X_I X_H}{X_I + X_H}. \quad (2.5)$$

Электромагнитная составляющая в контуре фазной изоляции с учетом параметров тела человека:

$$T_{IH} = \frac{X_{IH}}{R_{IH}}. \quad (2.6)$$

В случае пробоя кожных покровов сопротивление тела человека будет определяться только сопротивлением его внутренних органов $R_b \approx 1$ кОм. Тогда параметры цепи утечки:

$$R_{IH} = \frac{R_I}{1 + R_I}; \quad X_{IH} = X_I; \quad T_{IH} = \frac{X_I(1 + R_I)}{R_I}. \quad (2.7)$$

Для учета процесса низкочастотных поляризаций модель фазной изоляции дополнена последовательной RC -цепочкой, состоящей из емкости $C_{a\bar{b}}$ и активного сопротивления $R_{a\bar{b}}$ абсорбционному току $i_{a\bar{b}}$.

При математическом анализе электромагнитного переходного процесса в изоляции непосредственный учет дифференциального звена ($R_{a\bar{b}}$, $X_{a\bar{b}}$) приводит к усложнению математической модели, т.к. последовательная дифференциальная активно-емкостная цепь является так называемым «источником помех» в заданном колебательном контуре. При этом численное интегрирование, применяемое в решении подобного класса «жестких» задач, становится затруднительным.

В связи с этим целесообразно преобразовать последовательную абсорбционную ветвь ($R_{a\bar{b}}$, $X_{a\bar{b}}$) в параллельную (рисунок 2.7), для которой соответствующие сопротивления изоляции определяются по формулам:

$$R_A = \frac{R_{a\bar{b}}^2 + X_{a\bar{b}}^2}{R_{a\bar{b}}}, \quad X_A = \frac{R_{a\bar{b}}^2 + X_{a\bar{b}}^2}{X_{a\bar{b}}}. \quad (2.8)$$

Составляющие эквивалентного фазного сопротивления изоляции сети относительно земли:

$$R_{IF} = \frac{R_I R_A}{R_I + R_A} = \frac{R_I Z_{a\bar{o}}^2}{R_I R_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2}, \quad X_{IF} = \frac{X_I X_A}{X_I + X_A} = \frac{X_I Z_{a\bar{o}}^2}{X_I X_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2}, \quad (2.9)$$

где $Z_{a\bar{o}} = \sqrt{R_{a\bar{o}}^2 + X_{a\bar{o}}^2}$ – полное сопротивление току абсорбции в фазе сети.

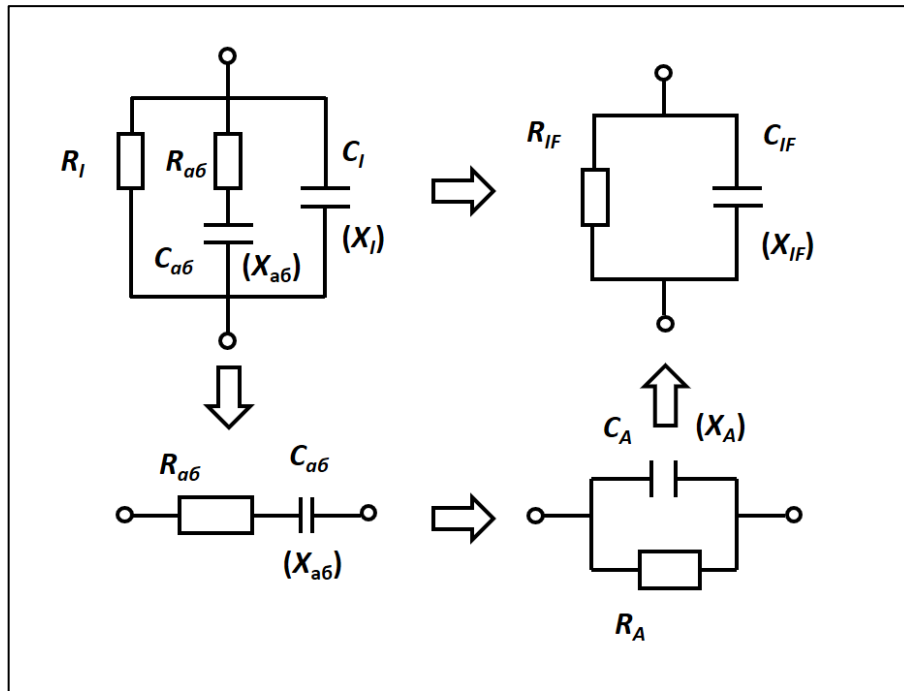


Рисунок 2.7 – Преобразование схемы замещения фазной изоляции сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции

Постоянная затухания электромагнитных колебаний в контуре, образованном активными и емкостными сопротивлениями изоляции, определится по формуле:

$$T_{IF} = \frac{X_{IF}}{R_{IF}} = \frac{X_I (R_I R_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2)}{R_I (X_I X_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2)} = T_I \cdot \frac{R_I R_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2}{X_I X_{a\bar{o}} + Z_{a\bar{o}}^2}. \quad (2.10)$$

При анализе режимов утечки тока необходимо учитывать появление несимметрии фазных напряжений в результате изменения сопротивлений изоляции сети относительно земли.

В условиях подземных электрических сетей из-за неравномерного увлажнения изоляции отдельных фаз, механических повреждений и других причин, согласно результатам исследований МГИ, случаи полной симметрии параметров изоляции наблюдаются редко [41].

Даже при наличии на настоящий момент времени достаточно детальных исследований, вопросы качественного анализа и количественной оценки несимметричных режимов утечки тока через изоляцию на землю в реальных условиях эксплуатации подземных электрических сетей, прогнозирования состояния изоляции являются открытыми.

Степень несимметрии сопротивлений изоляции отдельных фаз электроустановок иногда оценивается величиной коэффициента несимметрии [41, 56, 57]:

$$k_r = \frac{r_{max}}{r_{min}}; \quad k_x = \frac{x_{max}}{x_{min}}, \quad (2.11)$$

где r_{max} , r_{min} (x_{max} , x_{min}) – соответственно наибольшие и наименьшие активные (емкостные) сопротивления изоляции фаз.

Исследования [41] в условиях ПЭС ГП показали, что для емкостных сопротивлений фаз характерна незначительная несимметрия, которая практически не оказывает влияния на величину напряжения смещения нейтрали, в то время как для активных сопротивлений несимметрия может колебаться в широких пределах.

В работах [7, 66] было проведено исследование различных режимов утечки тока с учетом условия равенства между собой емкости фаз электрической сети при изменении коэффициента несимметрии в диапазоне $K_r = 1 - 5$.

В качестве показателя также используется коэффициент несимметрии активных составляющих сопротивления изоляции сети при условии, что емкость фаз в любом случае остается неизменной, определяемый соотношением [66, 160]:

$$k_{NR} = \frac{R_{max}}{R_{уст}}, \quad (2.12)$$

где R_{max} – максимальное значение активного сопротивления изоляции фазы электрической сети; $R_{уст}$ – устойчивый уровень активного сопротивления изоляции для контролируемой сети.

Недостатком данного методического подхода, является тот факт, что в условиях реального производства измерение фактических значений активного сопротивления изоляции фаз сети, а тем более емкостных составляющих, с

учетом деградационных процессов старения изоляции и происходящих в ней поляризационных процессов, представляется достаточно трудоемким и имеющим относительно высокую погрешность.

Еще один из критериев оценки несимметрии фазных напряжений рассмотрен в работе [24].

В случае возникновения в электрической сети с изолированной нейтралью несимметрии фазных проводимостей $\underline{Y}_A \neq \underline{Y}_B \neq \underline{Y}_C$, в соответствии с выражением:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (2.13)$$

появляется напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_0 \neq 0$, при этом фазные напряжения оказываются не равными по амплитуде мгновенных значений $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B \neq \underline{U}_C$.

Длительно существующее напряжение \underline{U}_0 в нейтрали характеризуется степенью относительной несимметрии сети:

$$u = \frac{|\underline{U}_0|}{|\underline{U}_F|} = |u' - ju''| \cdot \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} \cdot 100 \%. \quad (2.14)$$

где $\underline{U}_F = \underline{E}_F$ – фазное напряжение сети в симметричном режиме, когда относительные составляющие степени несимметрии фазного напряжения сети соответственно по емкостным и активным проводимостям:

$$u' = \frac{C_A + aC_B + a^2C_C}{C_A + C_B + C_C}, \quad u'' = \frac{G_A + aG_B + a^2G_C}{\omega(C_A + C_B + C_C)}. \quad (2.15)$$

Здесь d – коэффициент демпфирования (успокоения) свободных процессов в сети:

$$d = \frac{G_A + G_B + G_C}{\omega_0(C_A + C_B + C_C)},$$

где $\omega_0 = 314$ рад/с – радианная промышленная частота.

По своей сути коэффициент демпфирования d эквивалентен постоянной времени затухания электромагнитных колебаний в RC -контурах изоляции сети:

$$T_I = \frac{X_I}{R_I}, \quad (2.16)$$

где $X_I = \frac{1}{\omega C_\Sigma}$ – эквивалентное емкостное сопротивление изоляции фаз сети относительно земли ($C_\Sigma = C_A + C_B + C_C$); R_I – эквивалентное активное сопротивление фаз сети относительно земли.

Для воздушных электрических сетей с нормальным состоянием изоляции коэффициент демпфирования d , составляет от 2% до 6%. При загрязнении и увлажнении изоляции коэффициент демпфирования может увеличиться до 10%. Для кабельных сетей $d = 2 - 4\%$, но с учетом деградиационных процессов в кабелях с состарившейся изоляцией величина d может достигать 6%. В нормально работающих кабельных электрических сетях степень относительной несимметрии практически равна нулю [24].

Графическая интерпретация показателя несимметрии фазных напряжений электрической сети относительно земли приведена на рисунке 2.8.

Недостатком данного методического подхода является то, что при сопоставлении величин напряжения смещения нейтрали и фазного напряжения в условиях симметричного состояния изоляции невозможно определить вид утечки тока (однофазный или двухфазный). Данный показатель несимметрии целесообразно использовать при оценке режимов утечки, близких к критическим (обрыв фазы, замыкание на корпус и т.д.).

Приведенные выше показатели несимметрии параметров электрической сети не совсем удобны и мало информативны, т.к. требуют дополнительных измерений и расчетов для определения составляющих активных и емкостных проводимостей фаз изоляции сети относительно земли.

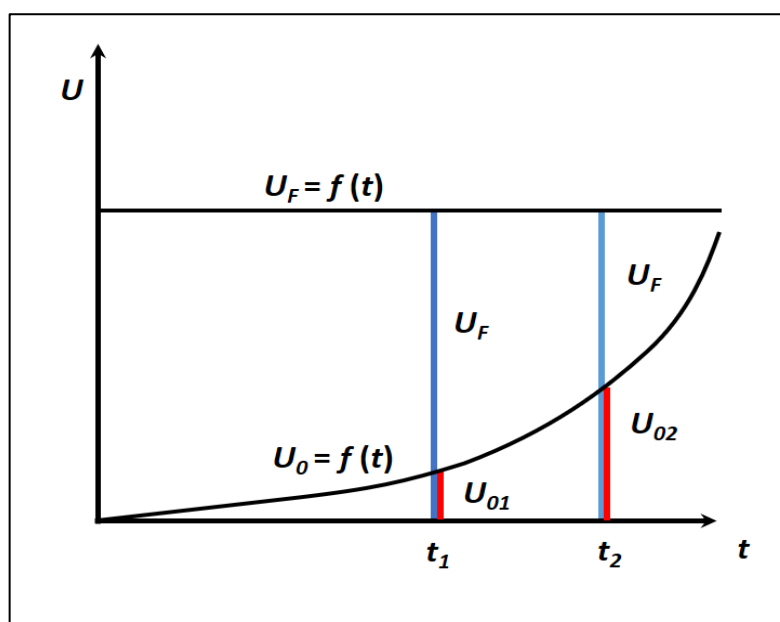


Рисунок 2.8 – Графики изменения U_F и U_0

Для более полного и качественного анализа режима утечки автором предлагается использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений:

$$k_{NU} = \frac{U_{F.max} - U_{F.min}}{U_{F.max}}, \quad (2.17)$$

где $U_{F.max}$, $U_{F.min}$ – соответственно максимальное и минимальное значения фазных напряжений при различных режимах утечки тока через изоляцию сети.

На рисунке 2.9 приведена графическая модель для оценки показателя несимметрии фазных напряжений.

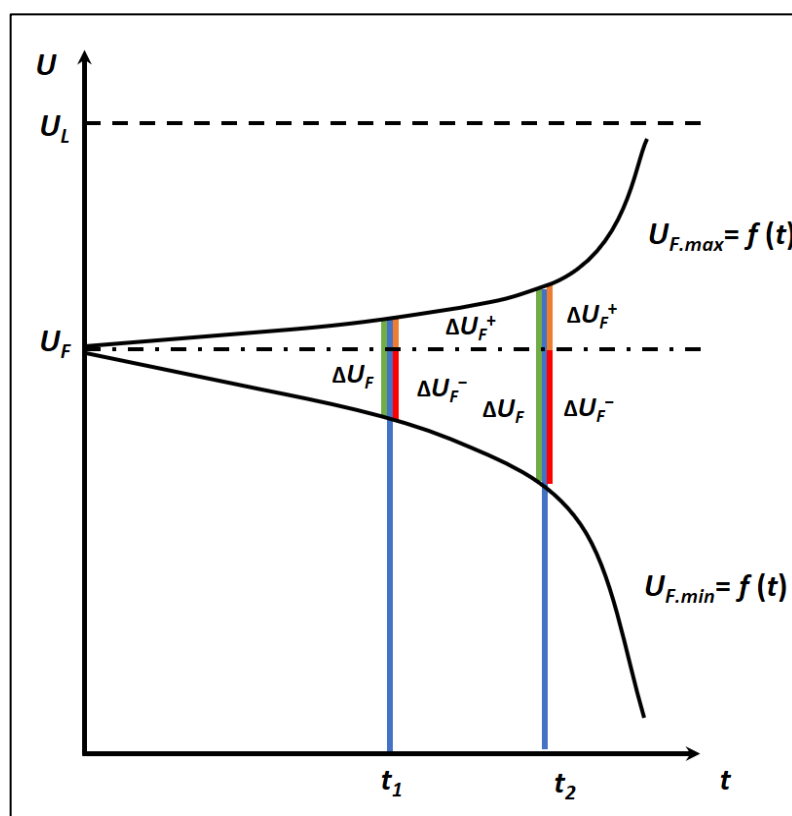


Рисунок 2.9 – Графическая модель для оценки показателя несимметрии фазных напряжений

Исследования показывают, что в случае несимметрии сопротивлений фаз электрической сети возникает несимметрия фазных напряжений. При этом в сети с изолированной нейтралью трансформатора увеличение напряжения в неповрежденной фазе (фазах) не может превысить величины линейного напряжения U_L , т.е. $U_{F.max} \leq U_L$. Величина $U_{F.max}$ определяется приращением относительно номинального фазного напряжения в симметричном режиме U_F на величину ΔU_F^+ . В тоже время, величина напряжения поврежденной фазы (фаз)

$U_{F.min}$ определяется уменьшением относительно номинального фазного напряжения U_F на величину ΔU_F^- .

Анализ режимов несимметричной утечки тока через изоляцию показывает, что в большинстве случаев выполняется условие $\Delta U_F^+ \neq \Delta U_F^-$.

Номинальное фазное напряжение в симметричном режиме U_F может быть представлено в виде равенств:

$$U_F = U_{F.max} - \Delta U_F^+ \quad (2.18)$$

или

$$U_F = U_{F.min} + \Delta U_F^-. \quad (2.19)$$

Если приравнять правые части уравнений (2.18) и (2.19), то получим уравнение:

$$U_{F.max} - \Delta U_F^+ = U_{F.min} + \Delta U_F^-. \quad (2.20)$$

При переносе $U_{F.min}$ в левую, а ΔU_F^+ в правую части уравнения (2.20) получим:

$$U_{F.max} - U_{F.min} = \Delta U_F^+ + \Delta U_F^-. \quad (2.21)$$

Разделив правые и левые части уравнения (2.21) на величину $U_{F.max}$ получим равенство:

$$\frac{U_{F.max} - U_{F.min}}{U_{F.max}} = \frac{\Delta U_F^+ + \Delta U_F^-}{U_{F.max}}. \quad (2.22)$$

Обозначим левую часть уравнения (2.22) как коэффициент несимметрии фазных напряжений k_{NU} :

$$k_{NU} = \frac{U_{F.max} - U_{F.min}}{U_{F.max}}, \quad (2.23)$$

а числитель правой части уравнения (2.22) как абсолютное приращение:

$$\Delta U_F = \Delta U_F^+ + \Delta U_F^-.$$

Тогда выражение, определяющее величину коэффициента несимметрии фазных напряжений k_{NU} , примет вид:

$$k_{NU} = \frac{U_{F.max} - U_{F.min}}{U_{F.max}} = 1 - \frac{U_{F.min}}{U_{F.max}} = \frac{\Delta U_F}{U_{F.max}}. \quad (2.24)$$

Анализ свойств изоляционных материалов и их представление в схемах замещения электрических сетей позволил сделать следующие выводы и допущения.

1. При общем анализе электрических сетей целесообразно представлять фазную изоляцию в виде двухполюсника, частью которого является эквивалентный диэлектрик, электрические параметры которого определяются основными свойствами изоляции электрической сети.

2. При анализе несимметричных режимов утечки схему замещения изоляции электрической сети можно представить в виде сосредоточенных фазных активных сопротивлений и емкостей.

3. Цепь утечки тока через тело человека достаточно представить активным сопротивлением его внутренних органов, с учетом того обстоятельства, что при напряжениях свыше 40 В происходит пробой кожных покровов и емкостное сопротивление кожи фактически равно нулю.

4. Для исследования влияния низкочастотных поляризаций на величину сопротивления изоляции необходимо учесть его абсорбционные составляющие: активное сопротивление и емкость абсорбции.

5. Для исследования резонансных режимов в сети с изолированной нейтралью компенсирующие дроссели могут быть представлены в расчетной схеме замещения соответствующими фазными индуктивными сопротивлениями.

6. Для разработки способов и средств пофазного контроля изоляции необходимо установить количественные и качественные показатели, характеризующие взаимосвязь между фазными напряжениями и параметрами изоляции электрической сети относительно земли.

7. Необходимо установить и обосновать критерии оценки влияния несимметрии сопротивления фазной изоляции на характер режима утечки и оценить степень его влияния на надежность и безопасность работы в электрических сетях.

Конфигурация подземной электрической сети напряжением до 1140 В представляет собой установку автоматического выключателя и УЗО на

магистральном кабеле, по которому осуществляется подача напряжения на распределительный пункт низкого напряжения (РП-НН), оборудованный серией магнитных пускателей или станцией управления, от которых идет распределение электроэнергии по двигателям отдельных горных машин и установок.

УЗО осуществляет оперативный контроль режимов утечки тока и компенсацию его емкостной составляющей для всей электрически связанной участковой сети, находящейся в рабочем режиме.

За время срабатывания УЗО ($t_{сз} \leq 0,2$ с) величины фазных напряжений и токов утечки, за исключением периода гашения электрической дуги в контакторе автоматического выключателя, определяются полными активными и емкостными сопротивлениями изоляции электрической сети.

После срабатывания УЗО отключенная от источника питания электрическая сеть остается под напряжением, величина и продолжительность существования которого зависит от электромагнитной составляющей T_L , определяющей скорость затухания колебаний в RC -контуре, образованном активным сопротивлением и емкостью изоляции, а также от эквивалентной постоянной времени $T_{f\beta}$, характеризующей режим генерирования ЭДС группой отключаемых электродвигателей.

В течение времени $t_{в.гр.}$ от момента отключения автоматического выключателя до момента размыкания силовых контакторов магнитных пускателей РП-НН блок автоматической компенсации УЗО обеспечивает снижение величины емкостной составляющей тока утечки. Отключение магнитных пускателей в зависимости от напряжения питания катушки контакторов происходит при снижении напряжения до $0,55U_{ном}$ (U_K^{\sim}) и $0,25U_{ном}$ ($U_K^=$).

После отключения аппаратов управления РП-НН величина остаточного напряжения и продолжительность его воздействия определяется параметрами изоляции ответвления, сопротивлением цепи утечки тока и ЭДС отдельного двигателя. В этом случае компенсатор емкостного тока уже не работает.

Таким образом, при анализе режимов утечки тока с электродвигателями важно учитывать временные интервалы отключения электрической сети.

Одними из важнейших критериев, по которым можно выполнить оценку состояния электробезопасности электрической сети при возникновении переходных процессов являются:

- ток $I_{h.сз.}$, протекающий через тело человека, и количество электричества $Q_{h.сз.}$, воздействующего на него за время срабатывания защиты $t_{сз.}$;
- ток $I_{h.эдс.}$, протекающий через тело человека, и количество электричества $Q_{h.эдс.}$, воздействующего на него за время генерирования электродвигателями обратной ЭДС $t_{эдс.}$.

Для получения достоверной количественной оценки указанных критериев и установления их функциональной связи с характеризующими параметрами выполняется математический анализ результатов моделирования переходных процессов на основе множественного корреляционно-регрессионного анализа, заключающийся в определении параметров эмпирической зависимости между совокупностью факторов и оценке объективности принятой гипотезы.

Графический анализ показал, что существенное влияние на приведенные критерии оказывают как параметры изоляции фаз сети относительно земли R_I и C_I , так и постоянная времени затухания ЭДС ротора двигателя T_f (эквивалентная постоянная времени – для группы двигателей $T_{f\beta}$).

Ранее исследователями [8, 28, 152] были установлены подобные зависимости, однако они не давали действительной количественной и качественной оценки из-за существенных допущений и ограничений.

Для установления зависимостей необходимо составляющие сопротивления изоляции фаз сети относительно земли представить постоянной затухания электромагнитных колебаний T_h в контуре, образованном этими элементами с учетом сопротивления человека R_h , прикоснувшегося к фазе.

Целесообразность установления функциональных зависимостей $Q_{h.сз.} = f(T_h)$, $Q_{h.эдс.} = f(T_h, T_f)$, обусловлена тем, что представленные в ней параметры в более

полной форме отражают соотношение параметров внешнего колебательного контура изоляции сети и внутреннего колебательного контура обмоток электродвигателей.

Последний фактор позволяет более точно эквивалентировать взаимное влияние двигателей при генерировании обратной ЭДС группой электродвигателей.

Для установления зависимостей $Q_{h.сз} = f(T_h)$, $Q_{h.эдс} = f(T_h, T_f)$ необходимо определить наличие корреляционной связи между указанными параметрами и оценить их достоверность.

При математическом моделировании для анализа различных видов несимметрии, а также анализа переходных процессов, как правило, используются классические и операторные методы моделирования, имеющие ряд существенных ограничений.

При математическом моделировании наиболее удобным является представление трехфазной электрической сети двухфазной математической моделью в координатах $\alpha, \beta, 0$, используемых для анализа переходных процессов в условиях несимметрии внешних цепей электрических сетей и симметрии внутренних цепей источника ЭДС. В этом случае модель представляется в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка [69, 152, 168].

Для математического анализа режимов утечки принята схема замещения подземной электрической сети, приведенная на рисунке 2.10.

Электрическая сеть представлена в виде схемы замещения, состоящей из линейных сосредоточенных активных сопротивлений r_a, r_b, r_c и емкостей c_a, c_b, c_c отдельных фаз сети относительно земли и источника ЭДС $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$.

Схема замещения цепи утечки тока через человека принята в соответствии с [40] и представляет собой сочетание активного сопротивления внутренних органов R_B , активного сопротивления R_K и емкости C_K кожных покровов.

Источник электроэнергии представлен в виде симметричного трехфазного трансформатора напряжения: $u_a = \dot{E}_a \cdot \cos(\omega_0 t)$, $u_b = \dot{E}_a \cdot \cos(\omega_0 t + 120^\circ)$, $u_c = \dot{E}_a \cdot \cos(\omega_0 t - 120^\circ)$.

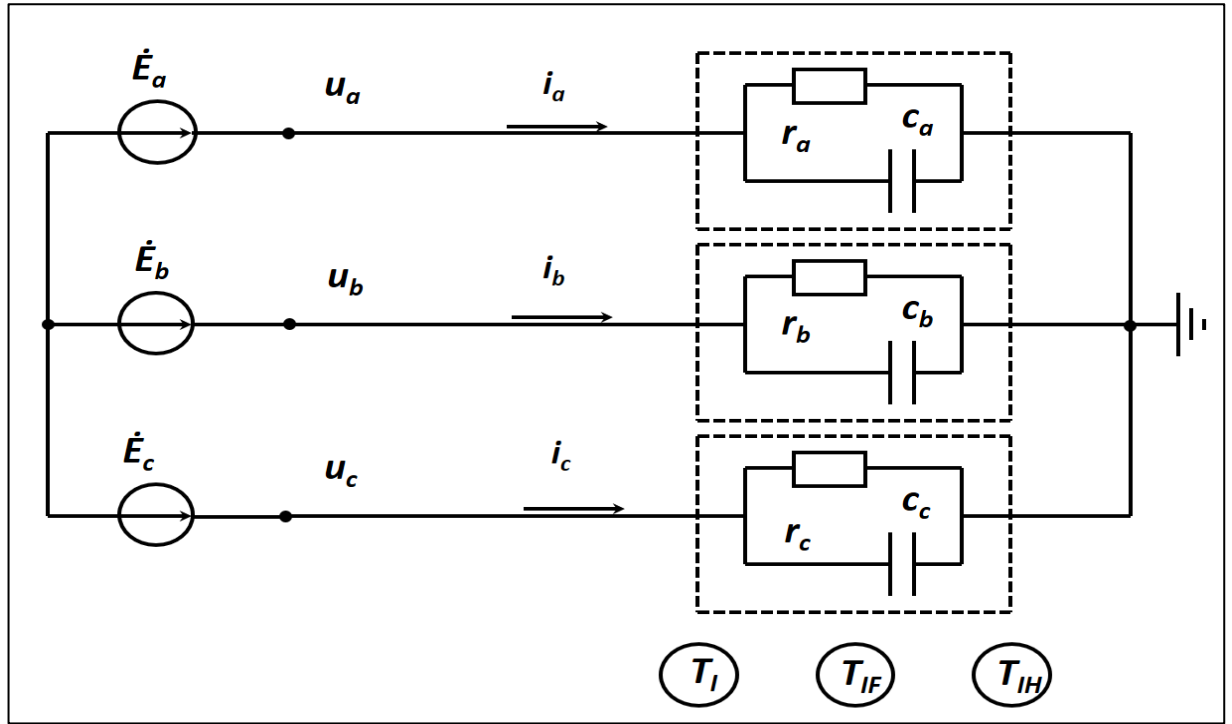


Рисунок 2.10 – Схема замещения цепей утечки тока через изоляцию

Система дифференциальных уравнений для модели цепей трехфазной электрической сети.

Уравнения цепей изоляции сети в координатах (a, b, c) .

Соответственно для активных и емкостных составляющих токов изоляции:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a = r_a i_{ar}; \dots u_a = \frac{1}{C_a} \int i_{ac} dt; \\ u_b = r_b i_{br}; \dots u_b = \frac{1}{C_b} \int i_{bc} dt; \\ u_c = r_c i_{cr}; \dots u_c = \frac{1}{C_c} \int i_{cc} dt, \end{array} \right. \quad (2.25)$$

где i_{ar}, i_{br}, i_{cr} – токи утечки через активные сопротивления изоляции фаз сети; i_{ac}, i_{bc}, i_{cc} – токи утечки через емкостные сопротивления изоляции фаз сети; u_a, u_b, u_c – фазные напряжения.

Систему уравнений (2.25) через составляющие тока утечки:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{ar} = \frac{u_a}{r_a}; \quad i_{ac} = C_a \frac{du_a}{dt}; \\ i_{br} = \frac{u_b}{r_b}; \quad i_{bc} = C_b \frac{du_b}{dt}; \\ i_{cr} = \frac{u_c}{r_c}; \quad i_{cc} = C_c \frac{du_c}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Так как

$$\begin{cases} i_{ar} + i_{ac} = i_a; \\ i_{br} + i_{bc} = i_b; \\ i_{cr} + i_{cc} = i_c, \end{cases} \quad (2.27)$$

то при условии равенства суммы $i_a + i_b + i_c = 0$ система (2.27) имеет вид:

$$\begin{cases} i_a = c_a \frac{du_a}{dt} + \frac{u_a}{r_a}; \\ i_b = c_b \frac{du_b}{dt} + \frac{u_b}{r_b}; \\ i_c = c_c \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{r_c}. \end{cases} \quad (2.28)$$

Приведенные уравнения в принципе позволяют получить с помощью ЭВМ необходимое решение. Однако они не удобны для расчетов, т.к. содержат дифференциальные уравнения с гармоническими коэффициентами.

В соответствии с теорией Парка-Горева необходимо уравнения (2.28), привести к системе декартовых координат $\alpha, \beta, 0$.

Чтобы осуществить такое приведение необходимо в этих уравнениях токи i_a, i_b, i_c выразить через i_α, i_β , а напряжения u_a, u_b, u_c — через u_α, u_β .

Для токов имеем уравнения:

$$\begin{cases} i_\alpha = \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}i_b - \frac{1}{3}i_c; \\ i_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}}; \quad 0 = i_a + i_b + i_c. \end{cases} \quad (2.29)$$

Решая эту систему уравнений относительно i_a, i_b, i_c получим:

$$\begin{cases} i_a = i_\alpha; \\ i_b = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta; \\ i_c = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta. \end{cases} \quad (2.30)$$

Для напряжений имеем уравнения:

$$\begin{cases} \bar{u}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(u_a + e^{j\frac{2\pi}{3}}u_b + e^{j\frac{4\pi}{3}}u_c); \\ u_0 = u_a + u_b + u_c. \end{cases} \quad (2.31)$$

Последнее уравнение (2.31) получено исходя из условий:

$$i_a + i_b + i_c = 0; \quad \cos(\gamma) + \cos(\gamma + 120^\circ) + \cos(\gamma + 240^\circ) = 0.$$

Уравнения (2.31) запишутся в виде системы:

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}u_b - \frac{1}{3}u_c; \\ u_\beta = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}}; \\ u_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c). \end{cases} \quad (2.32)$$

Решая эту систему относительно u_a, u_b, u_c найдем:

$$\begin{cases} u_a = u_\alpha + u_0; \\ u_b = -\frac{1}{2}u_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta + u_0; \\ u_c = -\frac{1}{2}u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta. \end{cases} \quad (2.33)$$

Подставляя значения $i_\alpha, i_\beta, i_c, u_a, u_b, u_c$ из (2.30) и (2.31) в (2.28), получим:

$$\begin{cases} i_\alpha = c_a \left(\frac{du_\alpha}{dt} + \frac{du_0}{dt} \right) + \frac{u_\alpha + u_0}{r_a}; \\ -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta = c_b \left(-\frac{1}{2}\frac{du_\alpha}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{du_\beta}{dt} + \frac{du_0}{dt} \right) \frac{1}{r_b} \left(-\frac{1}{2}u_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta + u_0 \right); \\ -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta = c_c \left(-\frac{1}{2}\frac{du_\alpha}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{du_\beta}{dt} + \frac{du_0}{dt} \right) + \frac{1}{r_c} \left(-\frac{1}{2}u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta + u_0 \right). \end{cases} \quad (2.34)$$

Уравнения (2.34) являются основными уравнениями для расчета электромагнитных процессов в электрических цепях.

Эти уравнения необходимо преобразовать на основании приведения параметров к системе относительных единиц в форме Коши [65, 121, 154].

Введем дополнительные параметры.

Синхронное время:

$$\tau = \omega_0 t,$$

где ω_0 – радианная (синхронная) частота вращения, рад/с.

Для уравнений 2.34 введем дополнительно параметры:

$$x_a = \frac{1}{\omega_0 c_a}, \quad x_b = \frac{1}{\omega_0 c_b}, \quad x_c = \frac{1}{\omega_0 c_c}; \quad T_a = \frac{x_a}{r_a}, \quad T_b = \frac{x_b}{r_b}, \quad T_c = \frac{x_c}{r_c},$$

где x_a, x_b, x_c – емкостные сопротивления изоляции фаз сети; T_a, T_b, T_c – постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в фазных контурах изоляции сети.

Тогда уравнения (2.34) примут вид:

$$\begin{cases} i_\alpha x_a = \left(\frac{du_\alpha}{d\tau} + \frac{du_0}{d\tau} \right) + (u_\alpha + u_0)T_a; \\ (-i_\alpha + \sqrt{3}i_\beta)x_b = \left(-\frac{du_\alpha}{d\tau} + \sqrt{3}\frac{du_\beta}{d\tau} + 2\frac{u_0}{d\tau} \right) + T_b(-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta + u_0); \\ (-i_\alpha - \sqrt{3}i_\beta)x_c = \left(-\frac{du_\alpha}{d\tau} - \sqrt{3}\frac{du_\beta}{d\tau} + 2\frac{u_0}{d\tau} \right) + T_c(-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta + u_0). \end{cases} \quad (2.35)$$

Для уравнений (2.35) получим:

$$\begin{cases} \frac{du_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{6}[-u_\alpha(4T_a + T_b + T_c) + \sqrt{3}u_\beta(T_b - T_c) - 2u_0(2T_a - T_b - T_c) + i_\alpha(4x_a + x_b + x_c) - \sqrt{3}i_\beta(x_b - x_c)]; \\ \frac{du_\beta}{d\tau} = \frac{1}{2\sqrt{3}}[u_\alpha - 2u_0(T_b - T_c) - \sqrt{3}u_\beta(T_b + T_c) - i_\alpha(x_b - x_c) + \sqrt{3}i_\beta(x_b + x_c)]; \\ \frac{du_0}{d\tau} = \frac{1}{6}[-u_\alpha(2T_a - T_b - T_c) + \sqrt{3}u_\beta(T_b - T_c) - 2u_0(T_a + T_b + T_c) + i_\alpha(2x_a - x_b - x_c) + \sqrt{3}i_\beta(x_b - x_c)]. \end{cases} \quad (2.36)$$

Система уравнений (2.36) устанавливает взаимосвязь между параметрами модели электрической сети и может быть использована для анализа переходных процессов, возникающих при различных видах несимметрии сопротивлений изоляции относительно земли, короткими замыканиями или прикосновением человека к токоведущим частям электрооборудования.

Для расчета тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазе C , примем систему уравнений:

$$\begin{cases} u_c = r_h i_{rh}; \\ u_c = \frac{1}{c_h} \int i_{ch} dt, \end{cases} \quad (2.37)$$

где i_{rh}, i_{ch} – соответственно активные и емкостные составляющие токов через тело человека, определяемые из выражений $i_{rh} = \frac{u_c}{r_h}, i_{ch} = c_h \frac{du_c}{dt}$.

Величина полного тока через человека определится из выражения:

$$i_h = c_h \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{r_h}. \quad (2.38)$$

Вводя синхронное время τ и параметр $x_{ch} = \frac{1}{c_h \omega_0}$, выражение (2.38) можно представить в виде:

$$i_h = \frac{1}{x_{ch}} \frac{du_c}{d\tau} + \frac{u_c}{r_h}.$$

Используя известные формулы приведения к координатам $\alpha, \beta, 0$ получим

$$i_h = \frac{1}{2x_{ch}} \left(-\frac{du_\alpha}{d\tau} - \sqrt{3} \frac{du_\beta}{d\tau} + 2 \frac{du_0}{d\tau} \right) + \frac{1}{2r_h} (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta + u_0). \quad (2.39).$$

Приведенные в этом параграфе уравнения (2.36) и (2.39) составляют основу для разработки алгоритма расчета режимов, протекающих в исследуемой системе при включении в нее человека, и создании соответствующего программного обеспечения [283, 284].

2.3. Обоснование метода исследования режимов утечки тока с учетом процесса генерирования электродвигателями обратной ЭДС

При исследовании переходных процессов, обусловленных режимом генерирования обратной ЭДС отключаемого асинхронного электродвигателя, с учетом несимметрии параметров внешней электрической сети, используем общепринятые допущения и ограничения: машина не насыщена, потери в стали отсутствуют; фазные обмотки симметричны; МДС обмоток и магнитные потоки распределены синусоидально вдоль окружности воздушного зазора; зазор равномерен; ротор симметричен. Реальная распределенная обмотка заменена сосредоточенной, а ее МДС принята равной МДС реальной обмотки [154].

Сущность явления режима генерирования обратной ЭДС отключаемых асинхронных электродвигателей довольно подробно отражена в литературе [28, 65, 77, 121, 154, 168].

Для математического анализа переходных процессов разработана схема замещения подземной электрической сети, приведенная на рисунке 2.11.

Представленная 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 УЗО, источники оперативного постоянного тока, компенсаторы, токоограничивающие реакторы, ФКУ, СФ и т.д.).

Асинхронный электродвигатель представлен в виде трехфазной модели статорных и роторных цепей. Исходными параметрами математической модели являются: максимальное значение взаимоиндукции между фазой статора и фазой ротора, когда их магнитные оси совпадают L_{af} , активные сопротивления фаз статора r_a, r_b, r_c и ротора r_{fa}, r_{fb}, r_{fc} , собственная индуктивность фаз статора L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} , и ротора $L_{faa}, L_{fbb}, L_{fcc}$, индуктивность фаз статора L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} и ротора $L_{fab}, L_{fbc}, L_{fca}$ с учетом магнитной связи с другими обмотками [158].

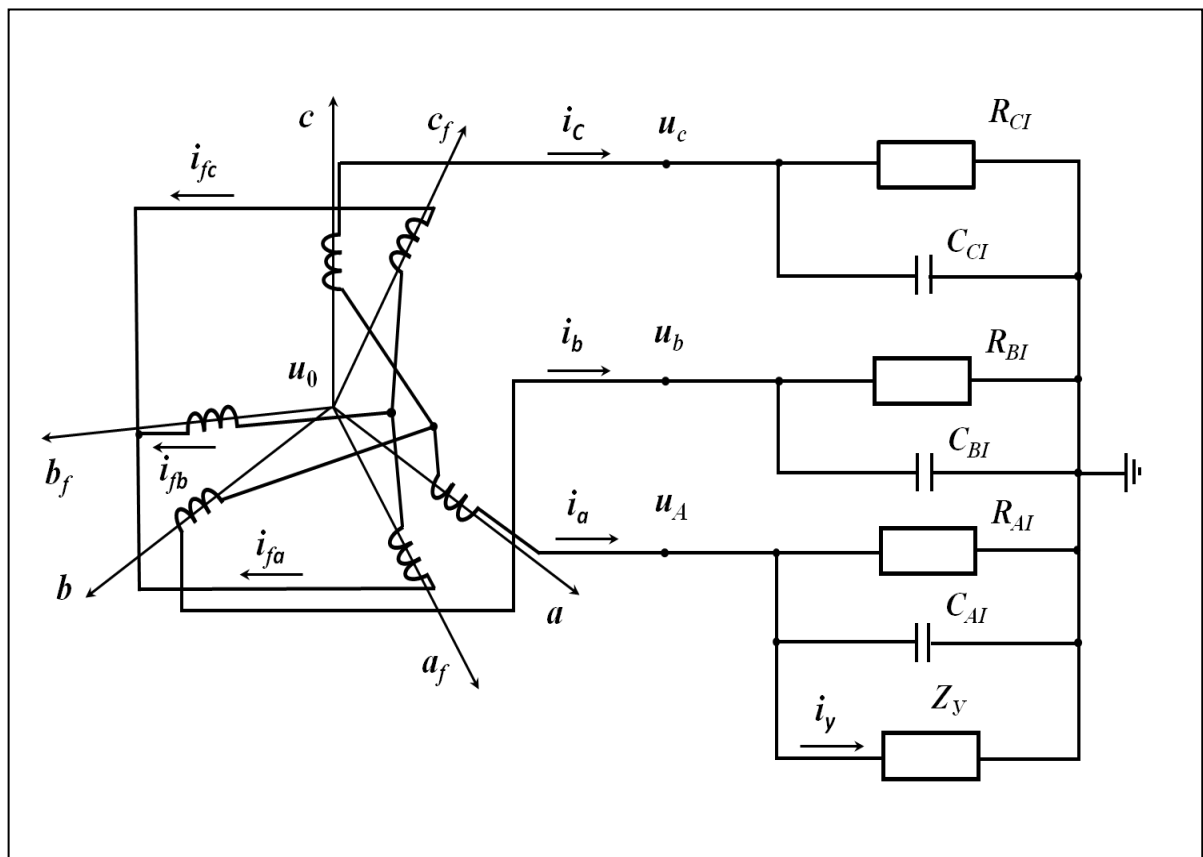


Рисунок 2.11 – Схема замещения электрической сети с асинхронным электродвигателем

Система дифференциальных уравнений для модели трехфазного асинхронного электродвигателя

Для анализа работы АД в режиме генерирования обратной ЭДС необходимо составить уравнения электрического равновесия для напряжений контуров и уравнения равновесия моментов, действующих на ротор.

Асинхронный электродвигатель представим как систему расположенных на статоре и роторе магнитно-связанных обмоток.

Уравнения статорной цепи АД в координатах a, b, c :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_0 + \frac{d}{dt}(L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c) + r_a i_a + \frac{d}{dt}L_{af}[\cos(\gamma)i_{af} + \\ + \cos(\gamma + 120)i_{bf} + \cos(\gamma + 240)i_{cf}] + u_a = 0; \\ u_0 + \frac{d}{dt}(L_{ab}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c) + r_b i_b + \frac{d}{dt}L_{af}[\cos(\gamma + 240)i_{af} + \\ + \cos(\gamma)i_{bf} + \cos(\gamma + 120)i_{cf}] + u_b = 0; \\ u_0 + \frac{d}{dt}(L_{ac}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c) + r_c i_c + \frac{d}{dt}L_{af}[\cos(\gamma + 120)i_{af} + \\ + \cos(\gamma + 240)i_{bf} + \cos(\gamma)i_{cf}] + u_c = 0; \end{array} \right. \quad (2.40)$$

где L_{af} – максимальное значение взаимоиндукции между фазой статора и фазой ротора, когда их магнитные оси совпадают; r_a, r_b, r_c – активные сопротивления фаз статора; L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} – собственная индуктивность фаз статора; L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} – индуктивность фаз статора с учетом магнитной связи с другими обмотками.

В силу симметрии имеем:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L, \quad L_{ab} = L_{bc} = L_{ac} = M. \quad (2.41)$$

С учетом условия:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.42)$$

и соотношений (2.41) систему уравнений (2.40) можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_0 + L \frac{di_a}{dt} + r_a i_a + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma) i_{af} + \\ + \cos(\gamma + 120) i_{bf} + \cos(\gamma + 240) i_{cf}] + u_a = 0; \\ u_0 + L \frac{di_b}{dt} + r_a i_a + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma + 240) i_{af} + \\ + \cos(\gamma) i_{bf} + \cos(\gamma + 120) i_{cf}] + u_b = 0; \\ u_0 + L \frac{di_c}{dt} + r_a i_a + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma + 120) i_{af} + \\ + \cos(\gamma + 240) i_{bf} + \cos(\gamma) i_{cf}] + u_c = 0; \end{array} \right. \quad (2.43)$$

где r – активное сопротивление фазы статора; $L = L_{aa} - M$ – индуктивность фазы статора.

Уравнения для роторной цепи в координатах a, b, c аналогичны уравнениям (2.40) и (2.41), но поскольку ротор короткозамкнут, то имеем:

$$u_{af} = u_{bf} = u_{cf} = 0; u_{f0} = 0, \quad (2.44)$$

где u_{f0} – потенциал нейтрали роторной цепи.

Соответственно в силу симметрии справедливо равенство:

$$L_{faa} = L_{fbb} = L_{fcc} = L_f, \quad L_{fab} = L_{fbc} = L_{fac} = M_f. \quad (2.45)$$

С учетом условия:

$$i_{af} + i_{bf} + i_{cf} = 0 \quad (2.46)$$

и соотношений (2.44) – (2.46) получим уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_f \frac{di_{af}}{dt} + r_f i_{af} + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma) i_a + \\ + \cos(\gamma + 120) i_b + \cos(\gamma + 240) i_c] = 0; \\ L_f \frac{di_{bf}}{dt} + r_f i_{bf} + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma + 240) i_a + \\ + \cos(\gamma) i_b + \cos(\gamma + 120) i_c] = 0; \\ L_f \frac{di_{cf}}{dt} + r_f i_{cf} + \frac{d}{dt} L_{af} [\cos(\gamma + 120) i_a + \\ + \cos(\gamma + 240) i_b + \cos(\gamma) i_c] = 0; \end{array} \right. \quad (2.47)$$

где r_f – активное сопротивление фазы ротора, а $L_f = L_{faa} = M$.

В соответствии с теорией Парка-Горева необходимо уравнения (2.43), (2.47) привести к единой системе координат. В условиях симметрии роторной цепи и несимметрии статорной цепи такой системой координат может быть только система, жестко связанная со статором.

При математическом моделировании переходных процессов в условиях несимметрии внешних цепей утечки тока через изоляцию и симметрии внутренних цепей источника ЭДС (асинхронного электродвигателя) наиболее рациональными является представление трехфазной сети двухфазной моделью в координатах $\alpha, \beta, 0$.

Опуская промежуточные преобразования, уравнение для статорных цепей в координатах $\alpha, \beta, 0$ имеет вид:

$$L \frac{d\bar{i}_{\alpha\beta}}{dt} + r\bar{i}_{\alpha\beta} + \bar{u}_{\alpha\beta} + L_{af} \frac{d\bar{i}_{\alpha\beta f}}{dt} = 0, \quad (2.48)$$

где $\bar{u}_{\alpha\beta}, \bar{i}_{\alpha\beta}, \bar{i}_{\alpha\beta f}$ – пространственные векторы соответственно напряжения статора, токов статора и ротора.

Для роторной цепи получим выражение:

$$L_f \left[\frac{d}{dt} - j\omega_p \right] \bar{i}_{f\alpha\beta} + r_f \bar{i}_{f\alpha\beta} + \frac{3}{2} L_{af} \left[\frac{d}{dt} - j\omega_p \right] \bar{i}_{\alpha\beta} = 0. \quad (2.49)$$

где $\omega_p = \frac{d\gamma}{dt}$ – скорость вращения ротора.

Эти уравнения удобнее преобразовать на основании приведения основных параметров к системе относительных единиц в соответствии с теорией Парка-Горева [65, 121, 154].

Введем дополнительные параметры.

Синхронное время:

$$\tau = \omega_0 t,$$

где ω_0 – радианная (синхронная) частота вращения в рад/с.

Параметры электродвигателя:

$$x_{af} = \frac{3}{2} L_{af} \omega_0; x_f = L_f \omega_0 = x_{af} + x_{f\sigma}; x = L \omega_0 = x_{af} + x_{\sigma};$$

$$T_f = \frac{x_f}{r_f}; \quad \mu = \frac{x_{af}^2}{xx_f},$$

где x_{af} – реактивное сопротивление, обусловленное реакцией якоря; $x_{f\sigma}$, x_σ – реактивные сопротивления рассеяния ротора и статора; x_f , x – полные реактивные сопротивления ротора и статора; T_f – постоянная времени обмотки ротора при разомкнутой статорной обмотке; μ – коэффициент магнитной связи между статором и ротором.

Дополнительные переменные:

$$\bar{e} = x_{af} \bar{l}_{f\alpha\beta}; \quad \omega_p^* = \frac{\omega_p}{\omega_0}. \quad (2.50)$$

Тогда уравнения (2.48) и (2.2.49) представляются в виде:

$$x \frac{d\bar{l}_{\alpha\beta}}{d\tau} + r_1 \bar{l}_{\alpha\beta} + \bar{u}_{\alpha\beta} + \frac{d\bar{e}}{d\tau} = 0; \quad (2.51)$$

$$T_f \left[\frac{d}{d\tau} - \omega_p^* \right] \bar{e} + \bar{e} + \mu x T_f \left[\frac{d}{d\tau} - \omega_p^* \right] \bar{l}_{\alpha\beta} = 0.$$

Полученные уравнения (2.51) не содержат гармонических коэффициентов и более удобны для исследования переходных процессов в условиях несимметрии внешних электрических цепей и симметрии роторных цепей. Эти уравнения, как и исходные, являются нелинейными и по этой причине могут быть решены лишь с помощью типовых алгоритмов и стандартного программного обеспечения ЭВМ, для чего их необходимо привести к форме Коши.

Для (2.51) получим:

$$x \frac{d\bar{l}_{\alpha\beta}}{d\tau} + \frac{d\bar{e}}{d\tau} = -\bar{u}_{\alpha\beta} - r_1 \bar{l}_{\alpha\beta}; \quad \mu x T_f \frac{d\bar{l}_{\alpha\beta}}{d\tau} + T_f \frac{d\bar{e}}{d\tau} = j\omega_p^* T_f (\bar{e} - \mu x \bar{l}_{\alpha\beta}) - \bar{e}.$$

Откуда:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{l}_{\alpha\beta}}{d\tau} = -\frac{1}{x^*} \left[\bar{u}_{\alpha\beta} + r_1 \bar{l}_{\alpha\beta} + j\omega_p^* (\bar{e} + \mu x^* \bar{l}_{\alpha\beta}) - \frac{1}{T_f} \bar{e}_{\alpha\beta} \right]; \\ \frac{d\bar{e}_{\alpha\beta}}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[j\omega_p^* (\bar{e} + \mu x^* \bar{l}_{\alpha\beta}) - \frac{1}{T_f} \bar{e}_{\alpha\beta} + \mu (\bar{u}_{\alpha\beta} + r_1 \bar{l}_{\alpha\beta}) \right], \end{cases} \quad (2.52)$$

где $x^* = x_\sigma$ – переходное сопротивление рассеяния в обмотках статора;

$\sigma = 1 - \mu$ – поток рассеяния в обмотках статора.

Уравнение механического равновесия ротора электродвигателя имеет вид:

$$T_j \frac{d\omega_p^*}{d\tau} + M_3 = M_B, \quad (2.53)$$

где T_j – механическая постоянная инерции ротора; M_ω – электромагнитный момент, развиваемый двигателем; M_B – механический момент на валу двигателя.

Так как активные сопротивления изоляции обмоток статора очень велики, то M_ω практически будет равен нулю и им в уравнении (2.53) можно пренебречь:

$$T_j \frac{d\omega_p^*}{d\tau} = M_B. \quad (2.54)$$

Если разделить действительные и мнимые части в уравнениях (2.52) и добавить к ним уравнения (2.53) получим систему уравнений для расчета процесса генерирования обратной ЭДС после отключения электродвигателя от источника питания. С учетом системы дифференциальных уравнений (2.36) для модели внешних цепей трехфазной электрической сети получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_\alpha}{d\tau} = -\frac{1}{X^*} \left[u_\alpha + ri_\alpha + \omega_r^* (e_\beta + \mu X^* i_\beta) - \frac{e_\alpha}{T_f} \right]; \\ \frac{di_\beta}{d\tau} = -\frac{1}{X^*} \left[u_\beta + ri_\beta + \omega_r^* (e_\alpha + \mu X^* i_\alpha) - \frac{e_\beta}{T_f} \right]; \\ \frac{de_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[-\omega_p^* (e_\beta + \mu x^* i_\beta) - \frac{e_\alpha}{T_f} + \mu (u_\alpha + ri_\alpha) \right]; \\ \frac{de_\beta}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[\omega_p^* (e_\alpha + \mu x^* i_\alpha) - \frac{e_\beta}{T_f} + \mu (u_\beta + ri_\beta) \right]; \\ \frac{du_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{6} [-u_\alpha (4T_a + T_b + T_c) + \sqrt{3}u_\beta (T_b - T_c) - 2u_0 (2T_a - \\ - T_b - T_c) + i_\alpha (4x_a + x_b + x_c) - \sqrt{3}i_\beta (x_b - x_c)]; \\ \frac{du_\beta}{d\tau} = \frac{1}{2\sqrt{3}} [u_\alpha - 2u_0 (T_b - T_c) - \sqrt{3}u_\beta (T_b + T_c) - \\ - i_\alpha (x_b - x_c) + \sqrt{3}i_\beta (x_b + x_c)]; \\ \frac{du_0}{d\tau} = \frac{1}{6} [-u_\alpha (2T_a - T_b - T_c) + \sqrt{3}u_\beta (T_b - T_c) - 2u_0 (T_a + \\ + T_b + T_c) + i_\alpha (2x_a - x_b - x_c) + \sqrt{3}i_\beta (x_b - x_c)]; \\ \frac{d\omega_p^*}{d\tau} = \frac{M_B}{T_j}. \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Разработанная модель позволяет связать в единую систему параметры внутренней изоляции двигателей и внешней изоляции сети относительно земли, исследовать переходные процессы, происходящие при возникновении

несимметричных утечек тока через изоляцию в режимах генерирования обратной ЭДС отключаемыми двигателями, оценить степень их опасности для человека при случайном прикосновении к фазе электрической сети.

Метод исследования режимов утечки тока в ПЭС ГП, позволяет установить закономерности, отражающие характер изменения векторов и степень несимметрии фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров сопротивления изоляции подземной электрической сети с учетом электромагнитных переходных процессов при срабатывании УЗО, генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, процесса низкочастотной поляризации и условий резонанса тока в колебательных контурах фазной изоляции.

2.4. Алгоритм и программа расчета параметров математической модели подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока

Математическое описание исследуемых переходных процессов представлено в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка.

Наиболее распространенным методом расчета систем дифференциальных уравнений является численное интегрирование, при котором решение представляется в виде последовательности дискретных значений частного интеграла уравнений [76].

На рисунке 2.12 изображена блок-схема алгоритма расчета токов и напряжений режимов, возникающих при включении человека в электрическую сеть с электродвигателями. Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что начальными условиями для интегрирования являются результаты расчета установившегося режима утечки тока. В процессе интегрирования осуществляется коррекция частоты затухающего напряжения сети с учетом изменения обратной ЭДС; рассчитываются выходные параметры сети, позволяющие произвести оценку состояния всей системы в любой момент времени.

Система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты, в основу которого положены формулы прогноза и коррекции [59].

Алгоритм расчета переходных процессов в сети с электродвигателями реализуется следующим образом.

На первом этапе после приведения исходных уравнений к линейному виду формируются массивы переменных $Y(I)$, левых частей дифференциальных уравнений $F(I)$, а также два вспомогательных массива $KV(I)$ и $K(J,I)$ для выполнения операций прогноза и коррекции переменных массива $Y(I)$.

Исходные данные для расчета, приведенные в системе относительных единиц, подразделяются на следующие группы:

- параметры двигателя ($P, \cos\varphi, X, R, X_{af}, X_f, R_f, T_j, \omega_p^*, M_B$);
- активные и емкостные сопротивления фаз электрической сети относительно земли ($X_A, X_B, X_C, R_A, R_B, R_C$);
- параметры сопротивления тела человека электрическому току (X_h, R_h);
- дополнительные параметры: шаг интегрирования (H), временные метки ($TP1, TP3, TP4, TP$), шаг вывода на печать (XX), корректирующий шаг (HI).

Параметры электродвигателей для расчета переходных процессов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные параметры асинхронных электродвигателей

Параметр двигателя	Численное значение параметра (о.е.) при мощности двигателя (кВт)						
	30	45	75	110	160	200	250
P	0,024	0,037	0,061	0,0907	0,132	0,1652	0,198
U	1	1	1	1	1	1	1
X	1,98	1,317	0,79	0,539	0,37	0,296	0,237
R	0,0382	0,0382	0,0382	0,0382	0,0382	0,0382	0,0382
X_f	2,03	1,356	0,81	0,554	0,38	0,305	0,244
R_f	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039
X_{af}	1,967	1,311	0,787	0,536	0,368	0,295	0,236
T_j	70,55	105,8	176,4	258,6	376,2	470,3	587,88
$\cos\varphi$	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88
M_B	0,1528	0,2356	0,3884	0,5775	0,8404	1,0518	1,2417

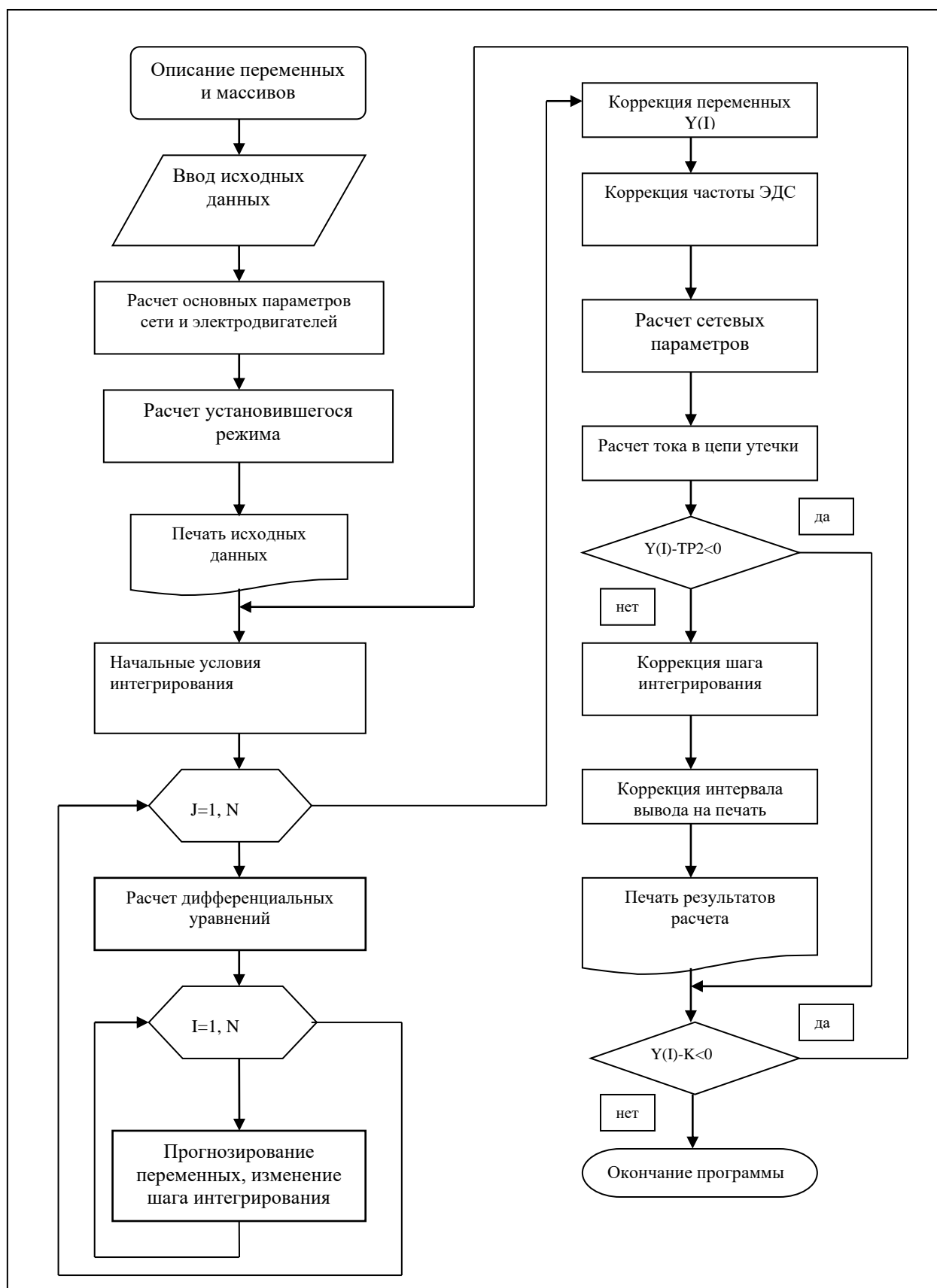


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритма расчета режима утечки тока

Для начального установившегося режима утечки вычисляются следующие основные сетевые параметры.

1. Постоянные времени электромагнитных колебаний в контурах, образованных активными и емкостными сопротивлениями фаз изоляции сети:

$$T_A = \frac{X_A}{R_A}; T_B = \frac{X_B}{R_B}; T_C = \frac{X_C}{R_C}.$$

2. Постоянная времени электромагнитных колебаний в контуре, образованном сопротивлением изоляции сети и параметрами тела человека:

$$T_I = \frac{T_{\text{эк}}}{T_A T_h},$$

где $T_h = \frac{X_h}{R_h}$ – постоянная времени колебаний в контуре, образованном активным R_h и емкостным X_h сопротивлением тела человека; $T_{\text{эк}} = \frac{X_A + X_h}{R_A + R_h}$ – постоянная времени колебаний в контуре, образованном эквивалентными активными и емкостными сопротивлениями изоляции фазы сети и тела человека.

Исходные параметры изоляции сети и тела человека для моделирования процесса генерирования обратной ЭДС приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные параметры изоляции сети и тела человека

R_I	кОм/фазу	10,5	31,5	60	120	180	300
	о.е.	1909	5727	10908,6	21817,2	32725,8	54543
C_I	мкФ/фазу	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,5
	о.е.	5790,1	1930,03	1158,02	827,16	579,01	386,03
Параметры сопротивления тела человека, о.е.						X_h	747,93
						R_h	1766,156

3. Параметры эквивалентного электродвигателя.

Магнитная проницаемость обмоток и поток рассеяния:

$$\mu = \frac{X_{\alpha f}^2}{X X_f}; \sigma = 1 - \mu. \quad (2.56)$$

Электромагнитная постоянная времени затухания обратной ЭДС отключаемого электродвигателя:

$$T_f = \frac{X_f}{R_f}. \quad (2.57)$$

Приведенное индуктивное сопротивление статорной обмотки и приведенная постоянная времени затухания обратной ЭДС:

$$X_1 = X\sigma; \quad T_{1f} = T_f\sigma. \quad (2.58)$$

Скольжение и угловая скорость ротора:

$$S = \frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - \frac{1}{T_{1f}^2}}; \quad \omega_R = 1 + S; \quad (2.59)$$

$$\text{где } = -\frac{\mu T_f U^2}{P X T_{1f}^2}.$$

Реактивная мощность двигателя:

$$Q = -\frac{U^2(1+S^2T_{1f}T_f)}{X(1+S^2T_{1f})}. \quad (2.60)$$

Активная и реактивная составляющие ЭДС и токов обмоток электродвигателя:

$$I_Q = \frac{P}{U}; \quad I_D = -\frac{Q}{U}; \quad E_Q = \frac{PX}{U}; \quad E_D = \frac{QX+U^2}{U}. \quad (2.61)$$

Полная ЭДС электродвигателя:

$$E = \sqrt{E_D^2 + E_Q^2}. \quad (2.62)$$

Угол сдвига между активной и реактивной составляющими ЭДС электродвигателя:

$$\varphi_{IE} = \arctg\left(\frac{E_Q}{E_D}\right). \quad (2.63)$$

Углы сдвига, определяемые активными и реактивными составляющими сопротивлений изоляции сети относительно земли:

$$\varphi_{ZA} = \arctg\left(-\frac{X_A}{R_A}\right); \quad \varphi_{ZB} = \arctg\left(-\frac{X_B}{R_B}\right); \quad \varphi_{ZC} = \arctg\left(-\frac{X_C}{R_C}\right). \quad (2.64)$$

Углы сдвига фаз между ЭДС электродвигателя и токами изоляции фаз электрической сети:

$$\varphi_{IA} = \varphi_E - \varphi_{ZA}; \quad \varphi_{IB} = \varphi_E - \varphi_{ZB}; \quad \varphi_{IC} = \varphi_E - \varphi_{ZC}. \quad (2.65)$$

Расчет установившегося режима необходим для задания начальных условий интегрирования. Для этого наряду с определением параметров переходного

процесса внутри двигателя рассчитываются фазные значения токов, напряжений и ЭДС в системе $u_\alpha, u_\beta, 0$ с целью последующего перевода в систему u_a, u_b, u_c .

Полные токи утечки через фазную изоляцию:

$$I_{IA} = E \frac{\sqrt{R_A^2 + X_A^2}}{R_A X_A}; \quad I_{IB} = E \frac{\sqrt{R_B^2 + X_B^2}}{R_B X_B}; \quad I_{IC} = E \frac{\sqrt{R_C^2 + X_C^2}}{R_C X_C}. \quad (2.66)$$

Фазные напряжения на зажимах статорной обмотки электродвигателя:

$$U_{FA} = U; \quad U_{FB} = U \cos \frac{2\pi}{3}; \quad U_{FC} = U \cos \left(-\frac{2\pi}{3} \right). \quad (2.67)$$

Фазные составляющие ЭДС и токов утечки через изоляцию электрической сети:

$$E_{FA} = E \cos \varphi_E; \quad E_{FB} = E \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_E \right); \quad E_{FC} = E \cos \left(-\frac{2\pi}{3} - \varphi_E \right), \quad (2.68)$$

$$I_{FA} = I_{IA} \cos \varphi_{IA}; \quad I_{FB} = I_{IB} \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi_{IB} \right); \quad I_{FC} = I_{IC} \cos \left(-\frac{2\pi}{3} - \varphi_{IC} \right).$$

4. Значения напряжения на зажимах статорной обмотки электродвигателя, а также фазные составляющие ЭДС и тока утечки через изоляцию ($u_\alpha, u_\beta, e_\alpha, e_\beta, i_\alpha, i_\beta$), приведенные к координатам $u_\alpha, u_\beta, 0$:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= \frac{1}{3} (2I_{FA} - I_{FB} - I_{FC}); \quad I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{FB} - I_{FC}); \\ E_\alpha &= \frac{1}{3} (2E_{FA} - E_{FB} - E_{FC}); \quad E_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (E_{FB} - E_{FC}); \\ U_\alpha &= \frac{1}{3} (2U_{FA} - U_{FB} - U_{FC}); \quad U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{FB} - U_{FC}); \quad U_0 = 0. \end{aligned} \quad (2.69)$$

После распечатки исходных данных и определения начальных условий интегрирования осуществляется непосредственная реализация поставленной задачи на основании метода Рунге-Кутты.

Для заданных массивов $Y(N)$, $A(N)$, $K(N,4)$, $F(N)$, $W(N)$ вводится число определяемых параметров N и их начальные значения $W(1) = 0$, $W(2) = I_a$, $W(3) = I_b$, $W(4) = E_a$, $W(5) = E_b$, $W(6) = U_a$, $W(7) = U_b$, $W(8) = U_0$, $W(9) = WR$, $W(10) = 0$.

Введенные данные массива $W(N)$ при помощи заданного программного цикла приравниваются к соответствующим параметрам массива $Y(N)$.

При помощи специальной подпрограммы *RKGS* [59] рассчитываются параметры массива $F(N)$, эквивалентных соответствующим параметрам левой части дифференциальных уравнений, и параметры коррекции для массива $K(N,4)$.

На каждом заданном шаге интегрирования каждый параметр левых частей системы дифференциальных уравнений рассчитывается и корректируется четыре раза.

Окончательная коррекция переменных при этом производится по формуле:

$$Y(I) = KV(I) + K(I, 1) + \frac{1}{6} \times \{2 \times [K(I, 2) + K(I, 1)] + K(I, 4)\}. \quad (2.70)$$

В результате обратного перевода определяются расчетные параметры:

$$\begin{aligned} U_{FA} &= Y(6); \quad U_{FB} = -\frac{1}{2}Y(6) + \frac{\sqrt{3}}{2}Y(7); \quad U_{FC} = -\frac{1}{2}Y(6) - \frac{\sqrt{3}}{2}Y(7); \\ I_{FA} &= Y(2); \quad I_{FB} = -\frac{1}{2}Y(2) + \frac{\sqrt{3}}{2}Y(3); \quad U_{FC} = -\frac{1}{2}Y(2) - \frac{\sqrt{3}}{2}Y(3); \\ U_0 &= Y(8). \end{aligned} \quad (2.71)$$

После корректировки шага интегрирования H происходит коррекция зоны вывода на печать промежуточных результатов и окончательная коррекция шага интегрирования $H1$.

После получения основных результатов расчета происходит сравнение временного интервала решения задачи TK с последовательным интервалом интегрирования $(XX+H1/2)$, и в случае превышения первого расчет заканчивается.

На основании разработанного алгоритма составлена программа расчета токов при генерировании обратной ЭДС асинхронными электродвигателями в сеть.

2.5. Синтез схем замещения подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока

На основании базовой математической модели, представленной в пункте 2.4, выполнен синтез схем замещения подземных электрических сетей для последующей реализации в виде компьютерных программ в системе *Simulink MATLAB*.

Особенностью данного программного обеспечения является возможность использования внутреннего математического аппарата при имитационном блочном моделировании динамических процессов в подземных электрических сетях, что в значительной степени упрощает решение поставленных задач и имеет несомненное преимущество в вопросах визуализации результатов эксперимента в плане получения осциллограмм изменения мгновенных и диаграмм действующих значений измеряемых электрических величин, результатов спектрального анализа гармонических составляющих напряжения и тока в контролируемых узлах схемы замещения, возможности оперативного изменения параметров и структуры модели.

В соответствии с поставленными задачами научных исследований выполнен синтез следующих схем замещения подземной электрической сети.

На рисунках 2.13 и 2.14 представлены схемы замещения подземной электрической сети промышленной частоты.

Силовой трансформатор представлен параметрами фазных ЭДС e_a, e_b, e_c и индуктивностями L_{T2} и активными сопротивлениями R_{T2} вторичных обмоток. Линейные напряжения u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc} на выходе вторичных обмоток трансформатора задаются по их действующим значениям.

Питающая электродвигатель кабельная линия представлена активными R_k и L_k индуктивными сопротивлениями токоведущих жил.

Асинхронный электродвигатель представлен внутренней моделью *Simulink* с активными R_s и индуктивными L_{1s} сопротивлениями статорных обмоток, взаимной индуктивностью M , активным сопротивлением R'_r и индуктивностью L'_{1s} ротора, приведенными к соответствующим параметрам статора, угловой скоростью ω_r , постоянной инерции ротора T_J и механическим моментом на валу двигателя M_b .

УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения к сети представлено параметрами активных сопротивлений R_F и индуктивностями L_F ветвей фильтра, активным сопротивлением R_P и индуктивностью цепи измерителя L_P . Параметры

компенсатора представлены разделительными емкостями C_0 , активным сопротивлением R_D и индуктивностью компенсирующего дросселя L_D .

УЗО с 3VD-фильтром присоединения к сети представлено параметрами активных сопротивлений R_F ветвей фильтра, активным сопротивлением R_P и индуктивностью цепи измерителя L_P , а также параметрами встроенной в *Simulink* модели идеального диода VD . Параметры компенсатора представлены разделительными емкостями C_0 , активным сопротивлением R_D и индуктивностью компенсирующего дросселя L_D , а также шунтирующей емкостью C_{SH} .

Изоляция питающей асинхронный электродвигатель кабельной линии представлена в виде сосредоточенных активных сопротивлений R_{IA} , R_{IB} , R_{IC} и емкостей C_{IA} , C_{IB} , C_{IC} фаз сети, параллельно которым включены последовательные цепочки емкостей C_{a6} и активных сопротивлений R_{a6} току абсорбции.

Исходной для синтеза схем замещения ПКЭС является типовая схема электроснабжения добычного участка угольной шахты, приведенная на рисунке 2.15.

Питание горных машин и механизмов участка осуществляется от трех ПУПП № 1 – 3 со вторичным напряжением 660/1140 В.

От ПУПП-1 получает питание комбайн очистного забоя с двумя АД привода резания мощностью по 315 кВт, двумя АД электродвигателями частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) подачи мощностью по 65 кВт и одним двигателем насоса мощностью 15 кВт. Длины и сечения кабельных линий приведены усредненными и могут варьироваться в достаточно широких пределах. Например, если формируется энергопоезд в состав которого входит ПУПП, комплект магнитных пускателей ПВИТ и ПЧ механизма подачи, то магистральный кабель КГЭШ 3×95+1×10 имеет минимальную протяженность в пределах до 4–5 м. При условии хорошей изоляции величина активного сопротивления может быть принята $R_l \geq 180$ мкФ/фазу, а емкостью $C_l \leq 0,01$ мкФ/фазу можно пренебречь. Звено постоянного тока в ПЧ с АИН также имеет малую протяженность (1 – 2 м) и находится во взрывозащищенном корпусе.

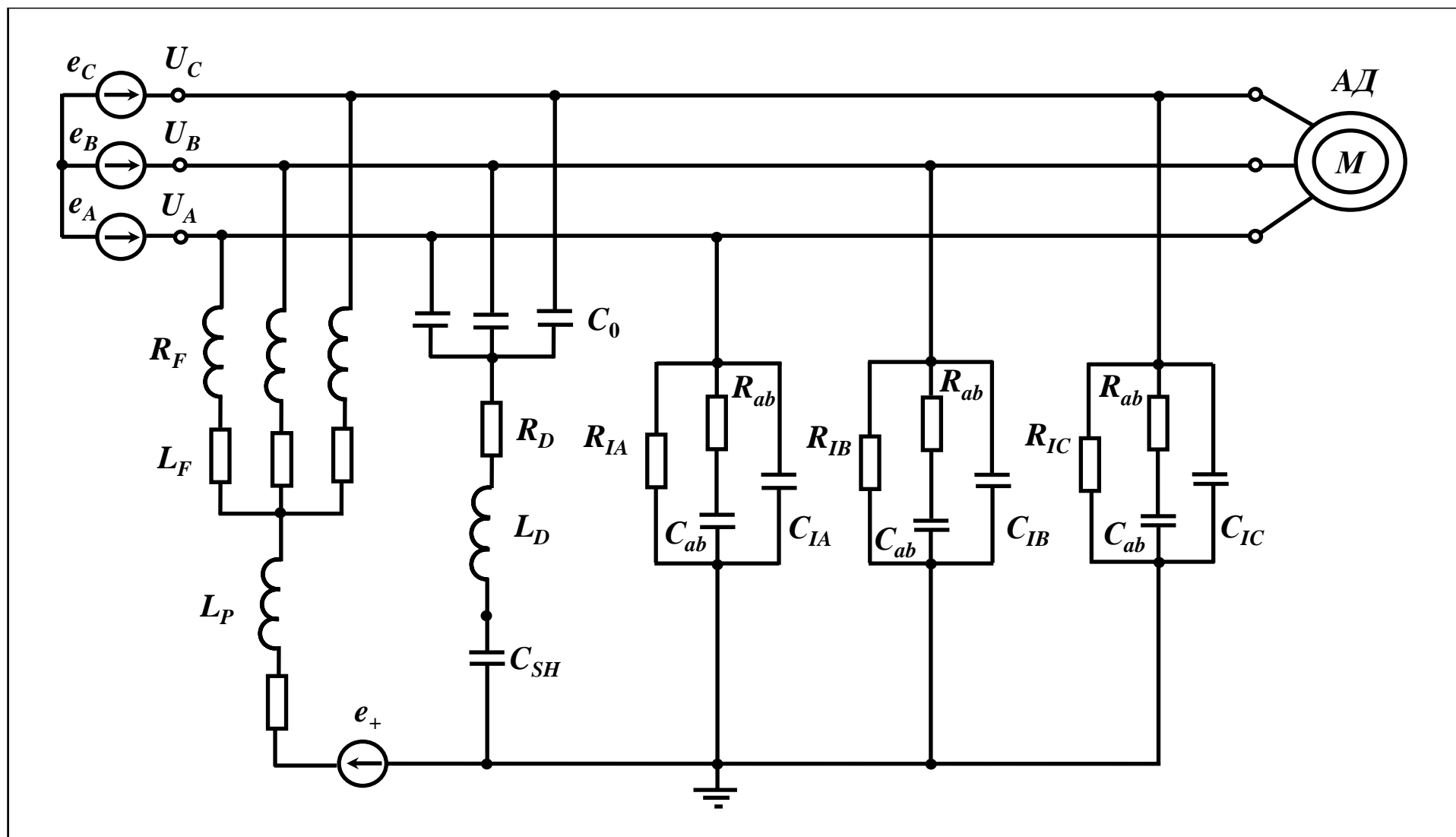


Рисунок 2.13 – Схема замещения подземной электрической сети промышленной частоты с активно-индуктивным фильтром присоединения УЗО и компенсатором емкостного тока утечки

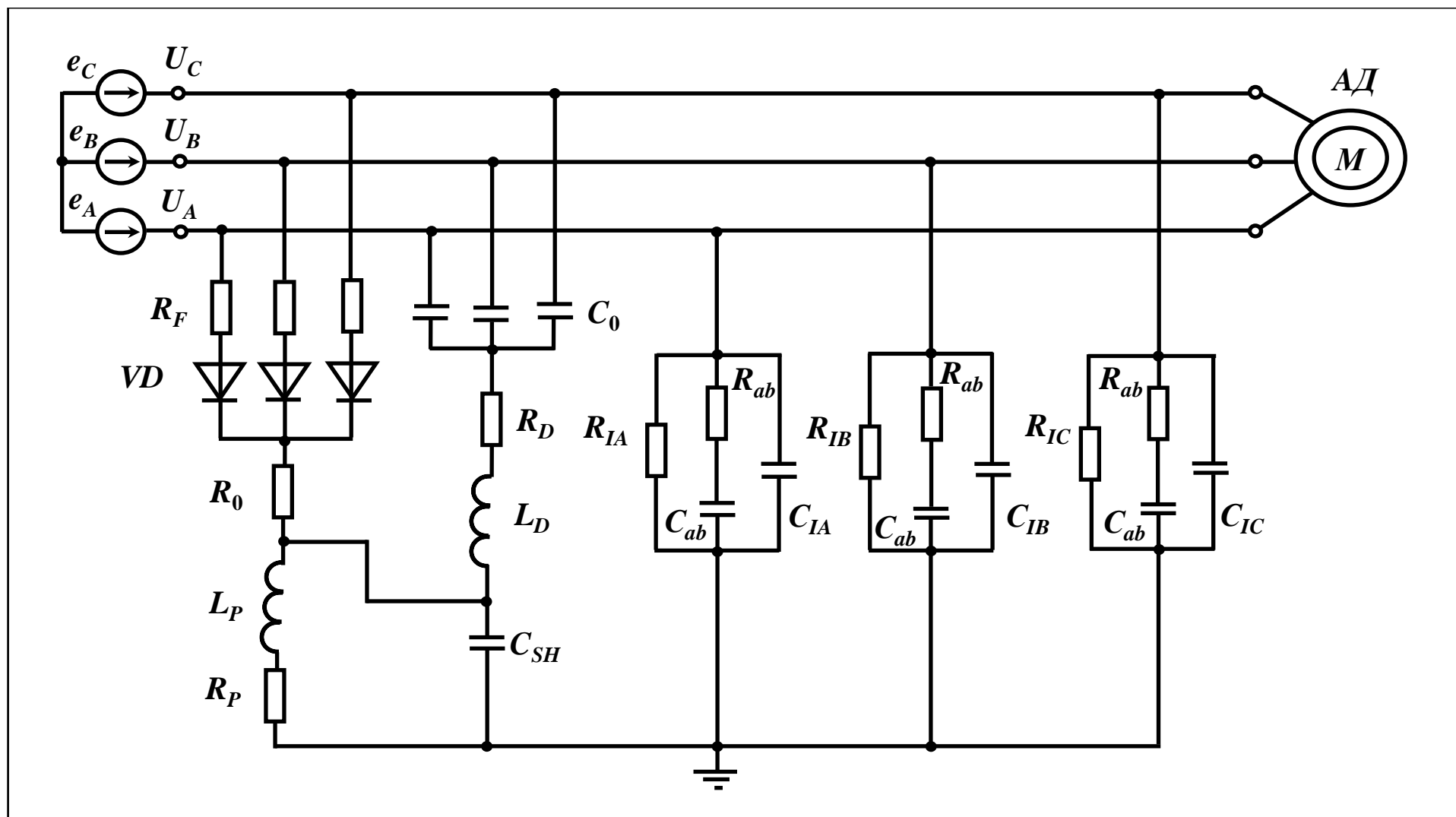


Рисунок 2.14 – Схема замещения подземной электрической сети промышленной частоты с активно-вентильным фильтром присоединения УЗО и компенсатором емкостного тока утечки

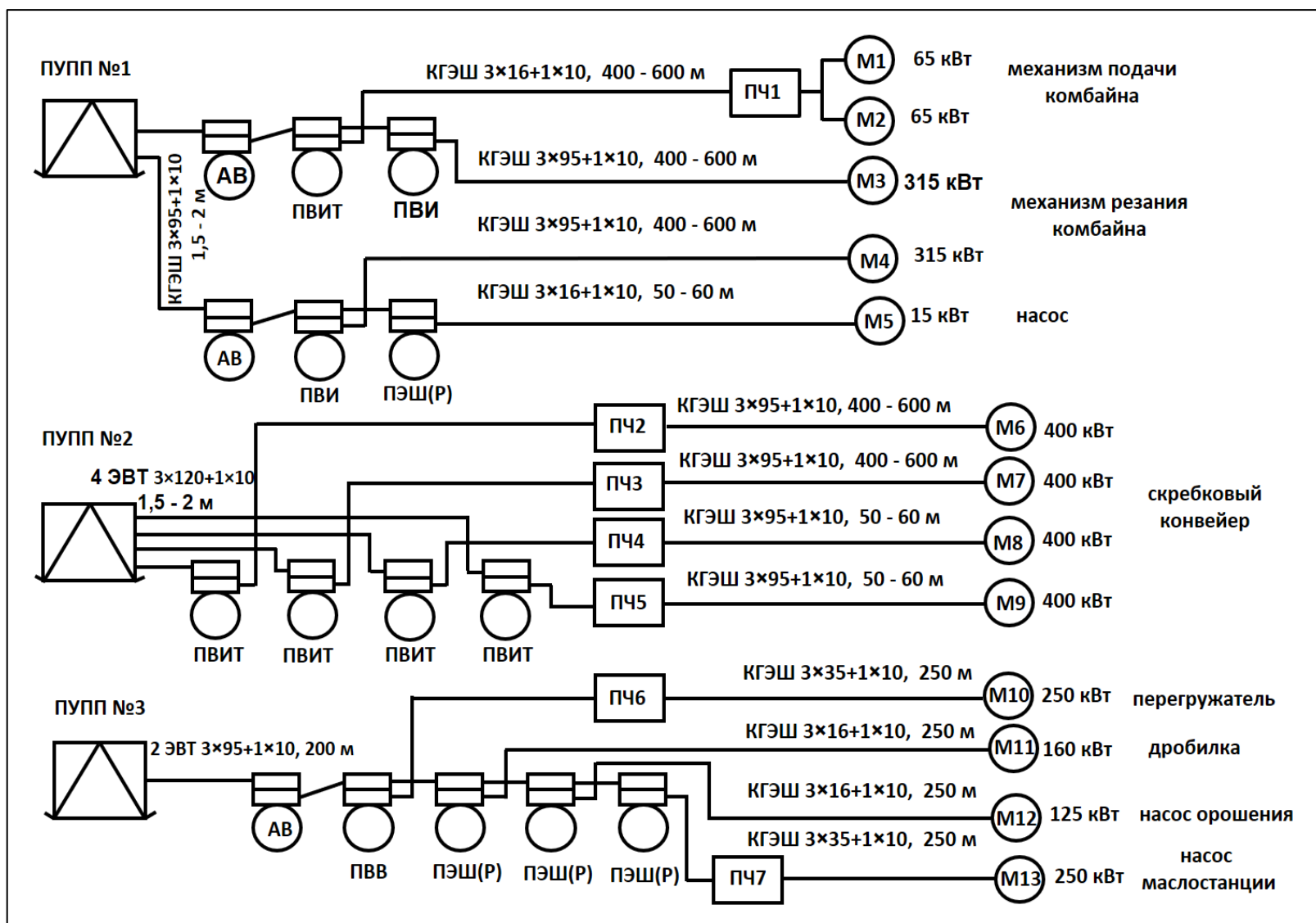


Рисунок 2.15 – Схема электроснабжения добычного участка шахты с питанием электроустановок в ПКЭС

Возможность утечки тока на приведенных участках присутствует, но вероятность такого события очень низкая. Тем не менее, в случае пробоя изоляции на корпус электрооборудования прикоснувшийся к нему человек может оказаться под действием напряжения пробитой фазы. Поэтому при синтезе схемы замещения необходимо параметры изоляции этих участков учитывать и рассматривать данные случаи как критические.

ЧРЭП механизма подачи может не входить в состав энергопоезда, если он установлен непосредственно на комбайне. В этом случае необходимо учитывать параметры изоляции питающего кабеля длина которого будет определяться протяженностью лавы (до 400 – 600 м) и расстоянием от энергопоезда до сопряжения вентиляционного штрека и очистного забоя (не менее 50 м). Участок кабеля от ПЧ с АИН до электродвигателей имеет малую протяженность, обусловленную конструкцией комбайна (1 – 2 м) и не находится во взрывозащищенном корпусе. Случай попадания человека под опасное воздействие напряжения электрической сети маловероятен, но последствия такого события не исследованы. Человек может попасть под прямое воздействие модулированного напряжения ПЧ и остаточного напряжения АД, переходящего в случае срабатывания УЗО в режим генерирования обратной ЭДС. Поэтому также необходимо рассматривать такой вариант как критический.

От ПУПП-2 получают питание ЧРЭП скребкового конвейера с установленной мощностью по 400 кВт. РП-НН-2 может входить в состав энергопоезда с ПУПП-2. В этом случае протяженность питающих кабелей ЭВТ $3 \times 120 + 1 \times 10$ также может быть уменьшена до 4 – 5 м. Отличительной особенностью участка является то, что ПЧ с АИН по техническим причинам не могут устанавливаться в непосредственной близости с асинхронными электродвигателями привода скребкового конвейера, установленными в конце лавы. Поэтому длина питающих их кабельных участков будет определяться протяженностью лавы и сопряжением с вентиляционным штреком.

От ПУПП-3 осуществляется питание перегружателя с асинхронным двигателем мощностью 250 кВт, дробилки (160 кВт), насоса орошения (125 кВт) и

маслостанции (250 кВт). Частотное регулирование предусмотрено для управления электроприводом перегружателя и маслостанции. Компоновка участка ПКЭС может иметь аналогичную комплектацию с выше рассмотренными вариантами.

Особой спецификой отличается компоновка отдельных насосных станций и ленточных конвейеров откаточного штреха. Питание ЧРЭП данных установок предполагает высокую вариативность схемы электроснабжения. Для ленточных конвейеров с электродвигателями до 400 кВт характерна протяженность более 1 км, что требует или установки преобразователей непосредственно в составе энергопоезда или стационарной установки в специальных нишах или камерах.

На рисунках 2.16 – 2.17 представлены синтезированные схемы замещения комбинированной подземной электрической сети ПКЭС-1 и ПКЭС-2, представленные в упрощенном варианте элементов, повторяющихся аналогично схемам на рисунках 2.13 и 2.14.

В подземной комбинированной электрической сети ПКЭС-3 (рисунок 2.18) рассмотрен вариант схемы замещения, когда питание асинхронного электродвигателя осуществляется по двум протяженным кабельным участкам:

- 1) участок от силового трансформатора понизительной подстанции до преобразователя частоты;
- 2) участок от преобразователя частоты до асинхронного электродвигателя.

Отличительной особенностью представленных схем является наличие в них преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения.

Преобразователь частоты представлен схемами замещения неуправляемого и активного вентильных выпрямителей в соответствии со встроенными в *Simulink* математическими моделями. Звено постоянного тока представлено *LC*-фильтром с индуктивностью L_0 и емкостью C_0 . Цепи утечки тока на землю в звене постоянного тока представлены соответствующими активными сопротивлениями R_+ , R_- и емкостями C_+ , C_- положительного и отрицательного полюсов.

Параметры фильтро-компенсирующих устройств (индуктивность $L_{FK(n)}$ и емкость $C_{FK(n)}$), токоограничивающих реакторов (индуктивности L_{R1} , L_{R2}) и синус-

фильтра (активные сопротивления R_{SF} , емкости C_{SF}) рассчитываются и выбираются в соответствии с общепринятыми методиками.

Для оценки эффективности работы компенсатора емкостного тока утечки предусмотрено два варианта подключения:

- 1) УЗО с компенсатором включены перед ПЧ;
- 2) компенсатор, как самостоятельное устройство, подключено после ПЧ

Изоляция питающих асинхронный электродвигатель кабельной линии представлена в виде сосредоточенных активных сопротивлений $R_{a1}, R_{b1}, R_{c1}, R_{a2}, R_{b2}, R_{c2}$, емкостей $C_{a1}, C_{b1}, C_{c1}, C_{a2}, C_{b2}, C_{c2}$ фаз сети относительно земли и индуктивностей $L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}, L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}$.

Для подземной комбинированной электрической сети (рисунок 2.16), в которой питание совмещенного блока преобразователь частоты с АИН – асинхронный электродвигатель осуществляется от силового трансформатора участковой понизительной подстанции по протяженному кабелю.

Для ПКЭС-1 (рисунок 2.17) питание асинхронного электродвигателя осуществляется по протяженному кабелю от энергопоезда в состав которого входит силовой трансформатор участковой понизительной подстанции, автоматический выключатель (пускатель) и преобразователь частоты.

Для оценки эффективности работы УЗО и компенсатора емкостного тока утечки предусмотрено три варианта подключения:

- 1) УЗО и компенсатор подключены перед ПЧ;
- 2) УЗО подключено перед преобразователем частоты, а компенсатор – после ПЧ;
- 3) УЗО и компенсатор подключены после ПЧ.

Фазные токи и междуфазные напряжения участков промышленной и регулируемой частоты, а также ток и напряжение звена выпрямленного тока контролируются приборами фиксации мгновенных и действующих значений.

В приведенных схемах замещения осуществляется измерение фазных напряжений и токов в цепях утечки через изоляцию, ветвях фильтра присоединения, цепи измерителя и компенсирующего дросселя УЗО.

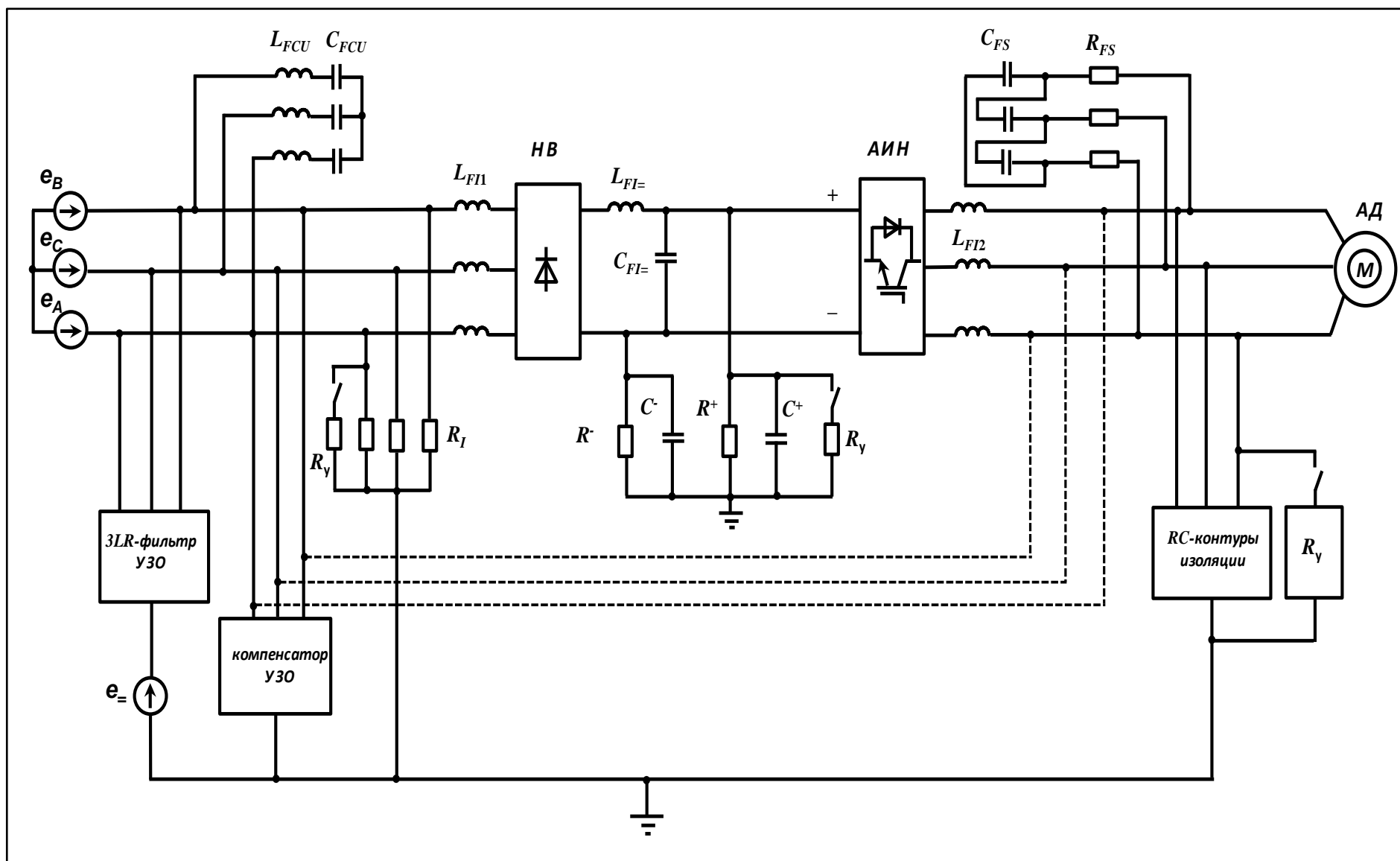


Рисунок 2.16 – Схема замещения ПКЭС-1

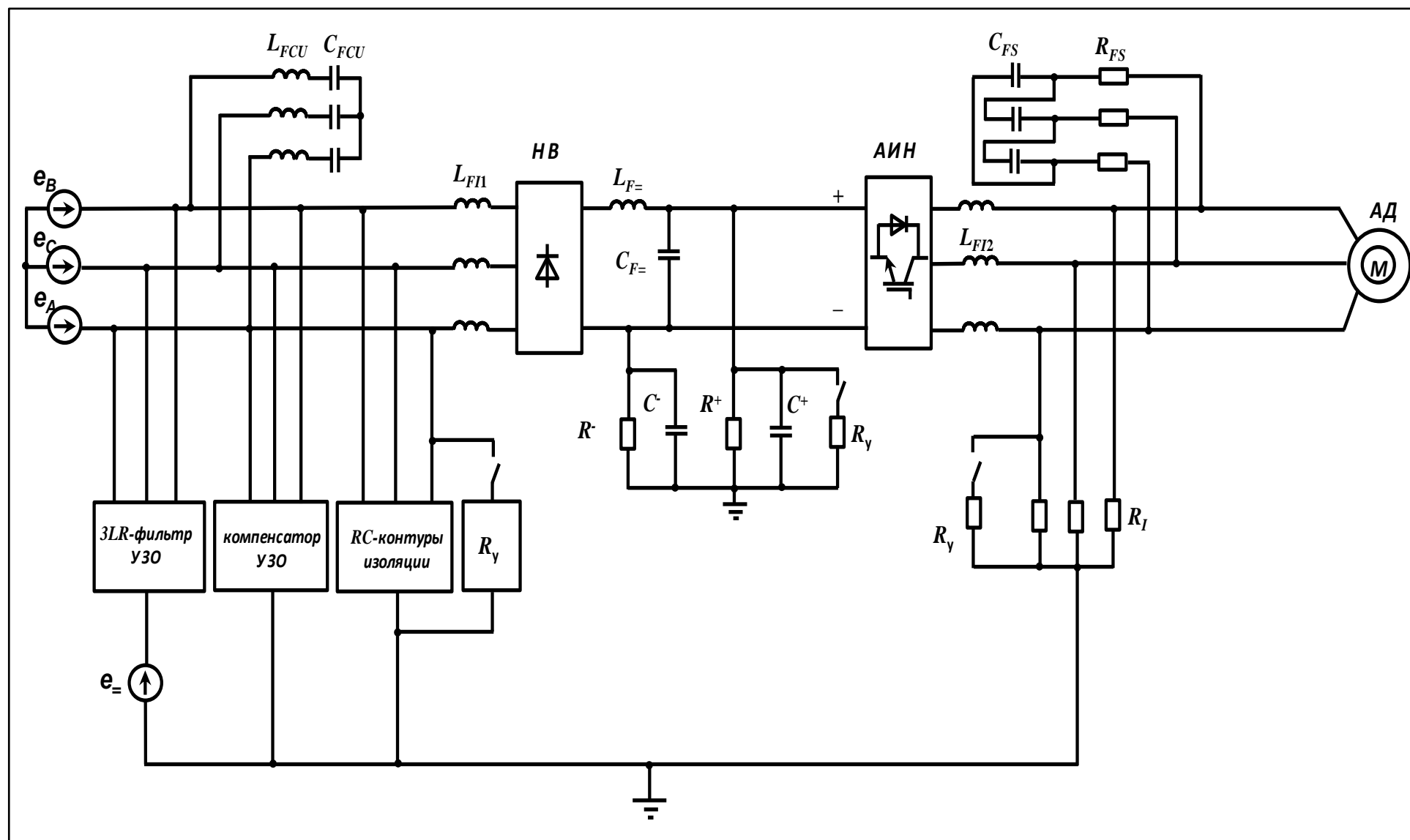


Рисунок 2.17 – Схема замещения ПКЭС-2

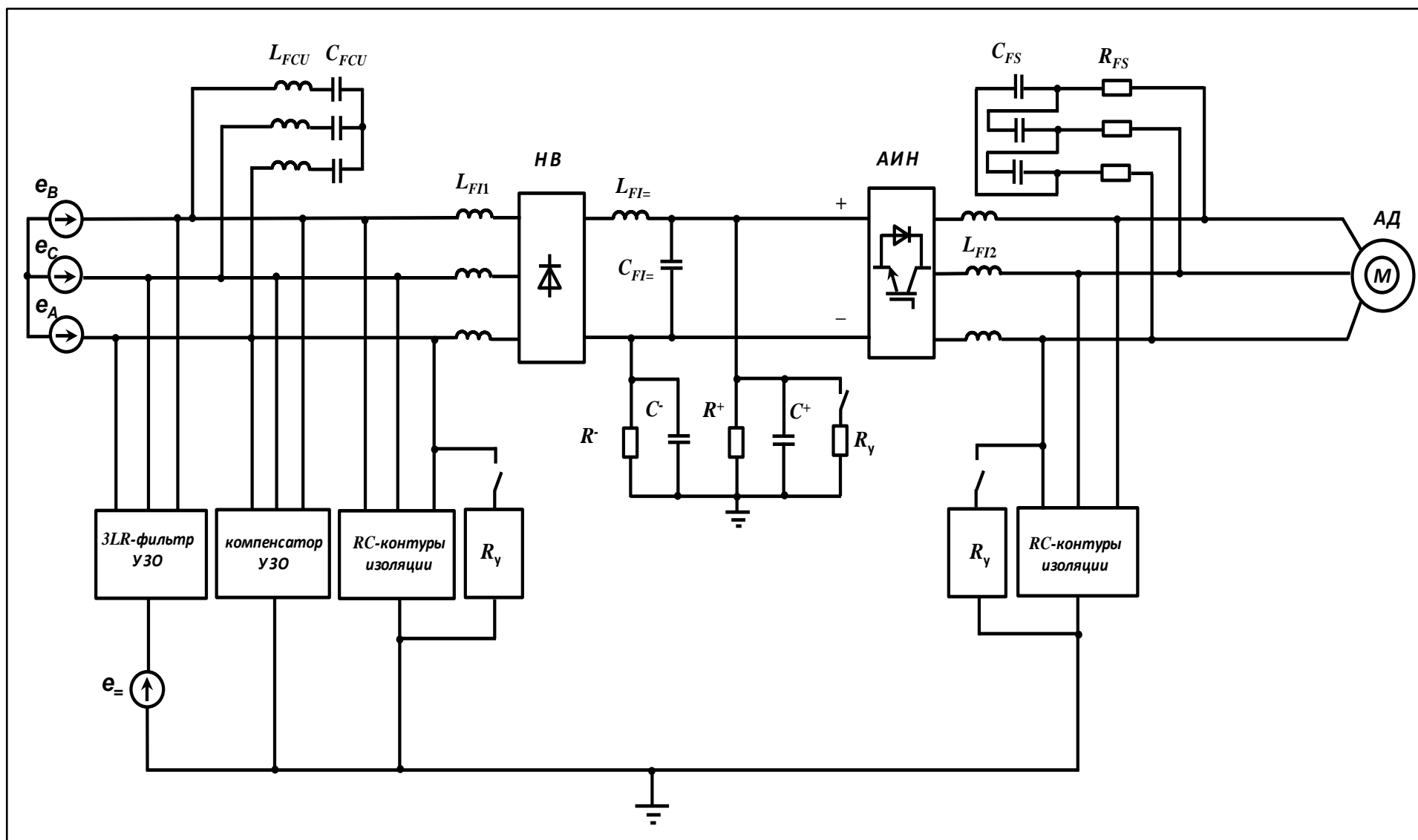


Рисунок 2.18 – Схема замещения ПКЭС-3

2.6. Выводы

1. В главе дано теоретическое обоснование методов исследования режимов утечки тока в подземных электрических сетях в основу которых положена универсальная математическая модель, отличающаяся представлением параметров фазной изоляции RC -контурами с соответствующими электромагнитными постоянными времени, позволяющая исследовать различные режимы утечки, в том числе с учетом процессов низкочастотной поляризации и генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

2. Определены параметры элементов схемы замещения шахтной подземной электрической сети и диапазоны их изменения, показатели степени несимметрии фазных напряжений сети относительно земли и токов утечки.

В качестве основного показателя предложено использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений электрической сети относительно земли.

3. Разработан алгоритм и программа расчета параметров математической модели ПЭС, позволяющей на основании принятой схемы замещения выполнить исследование и провести анализ режимов утечки тока в широком диапазоне изменения параметров источника ЭДС, изоляции и электродвигателей.

4. На основании синтеза универсальной схемы замещения ПЭС ПЧ разработаны математические модели для анализа переходных процессов при несимметричных режимах утечки тока с учетом параметров активно-емкостных контуров фазной изоляции, активно-индуктивных контуров обмоток асинхронных электродвигателей, параметров фильтров присоединения и цепи измерителя различного типа устройств защиты от токов утечки.

5. Разработаны математические модели для исследования высших гармонических составляющих напряжения и тока в ПКЭС, отличающиеся комплексным учетом параметров средств обеспечения качества электроэнергии, устройств защитного отключения, изоляции электрической сети, а также параметры преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения и взрывозащищенных асинхронных электродвигателей.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

3.1. Исходные положения

В подземных электрических сетях напряжением до 1140 В, в соответствии с требованиями электробезопасности, применяется режим с изолированной нейтралью силового трансформатора ПУПП.

Для осуществления функций контроля сопротивления изоляции, защитного отключения и компенсации емкостного тока утечки в силу необходимости реализации принятых способов и средств обеспечения необходимо создание искусственного смещения нейтральной точки путем установки различного типа фильтров присоединения элементов УЗО к электрической сети и введения высокоомного сопротивления в цепь измерителя. Для схем с активно-индуктивным фильтром присоединения необходимо в цепь измерителя дополнительно вводить внешний или дополнительный внутренний источник оперативного тока.

Научные исследования показали, что такие решения неизбежно отрицательно сказываются на защитном эффекте изоляции электрической сети. В связи с этим регламентами ГОСТов установлены ограничения на параметры УЗО, произвольное изменение которых может привести к негативным последствиям в случае возникновения утечки тока через человека, прикоснувшегося к токоведущим частям или корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением в случае коротких замыканий.

Для реализации метода исследования несимметричных режимов утечки в соответствии с поставленными в диссертационной работе задачами необходимо выполнить сравнительный анализ режимов однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию электрической сети для широкого диапазона изменения параметров схемы замещения. Проведение данного исследования позволит

выполнить анализ и оценку уровня несимметрии фазных напряжений при различных режимах утечки тока через изоляцию, в том числе и в критических режимах, моделирование которых в реальных условиях производства невозможно.

Отличительной особенностью разработанного метода моделирования режимов утечки тока является возможность непосредственного определения составляющей тока абсорбции в RC -контурах фазной изоляции, исследование характеристик которого ранее осуществлялось только косвенными методами, а оценка процессов низкочастотной поляризации оставалась не определенной.

При разработке фазочувствительных методов контроля изоляции необходимо выполнить количественную и качественную оценку характера изменения фазных напряжений и токов утечки в условии несимметрии параметров изоляции, в том числе при однополюсном включении человека в электрическую цепь утечки.

Проведение аналитических исследований позволяет:

- установить закономерности, отражающие характер изменения векторов и степень несимметрии 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;

- обосновать метод оценки степени опасности режимов утечки в подземных электрических сетях, отличающийся комплексным учетом несимметрии фазных напряжений относительно земли, составляющих сопротивления изоляции, уровня тока и длительности воздействия на человека за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

- обосновать методы пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостного тока в подземных электрических сетях с учетом степени несимметрии фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров

активного и емкостного сопротивления изоляции электрической сети в несимметричных режимах утечки.

3.2. Сравнительный анализ режимов однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию подземной электрической сети

Целью исследования являлось определение характера изменения фазных величин напряжения \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} и возникающего в результате несимметрии напряжения нулевой последовательности \dot{U}_0 (ННП) при вариативности активного и емкостного сопротивлений изоляции и проведение сравнительного анализа однофазной и двухфазной утечек тока.

Параметры схемы замещения фазной изоляции принимались при условии равенства емкостей $C_A = C_B = C_C$ и их изменения в диапазоне 0,1 – 1 мкФ/фазу. Активные составляющие принимались для режимов однофазной и двухфазной утечек тока при условии $R_A \neq R_B = R_C$ и различных комбинаций сопротивлений в диапазоне 10,5 – 300 кОм/фазу.

В результате аналитических исследований определялись величины \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} , \dot{U}_0 и углы сдвига φ_A , φ_B , φ_C , φ_0 между векторами фазных напряжений электрической сети относительно земли (см. Приложение П1. табл. П1.1 и П1.2).

Визуализация и верификация результатов проводилась на имитационной модели для исследования режимов утечки в изоляции сети с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО, приведенной на рисунке 3.1.

На рисунках 3.2 и 3.3 приведены характерные осциллограммы изменения фазных напряжений и токов, а также ННП и тока нулевой последовательности (ТНП) в цепи измерителя УЗО соответственно в режиме однофазной утечки ($R_a = 31,5$ кОм, $R_b = R_c = 180$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,1$ мкФ).

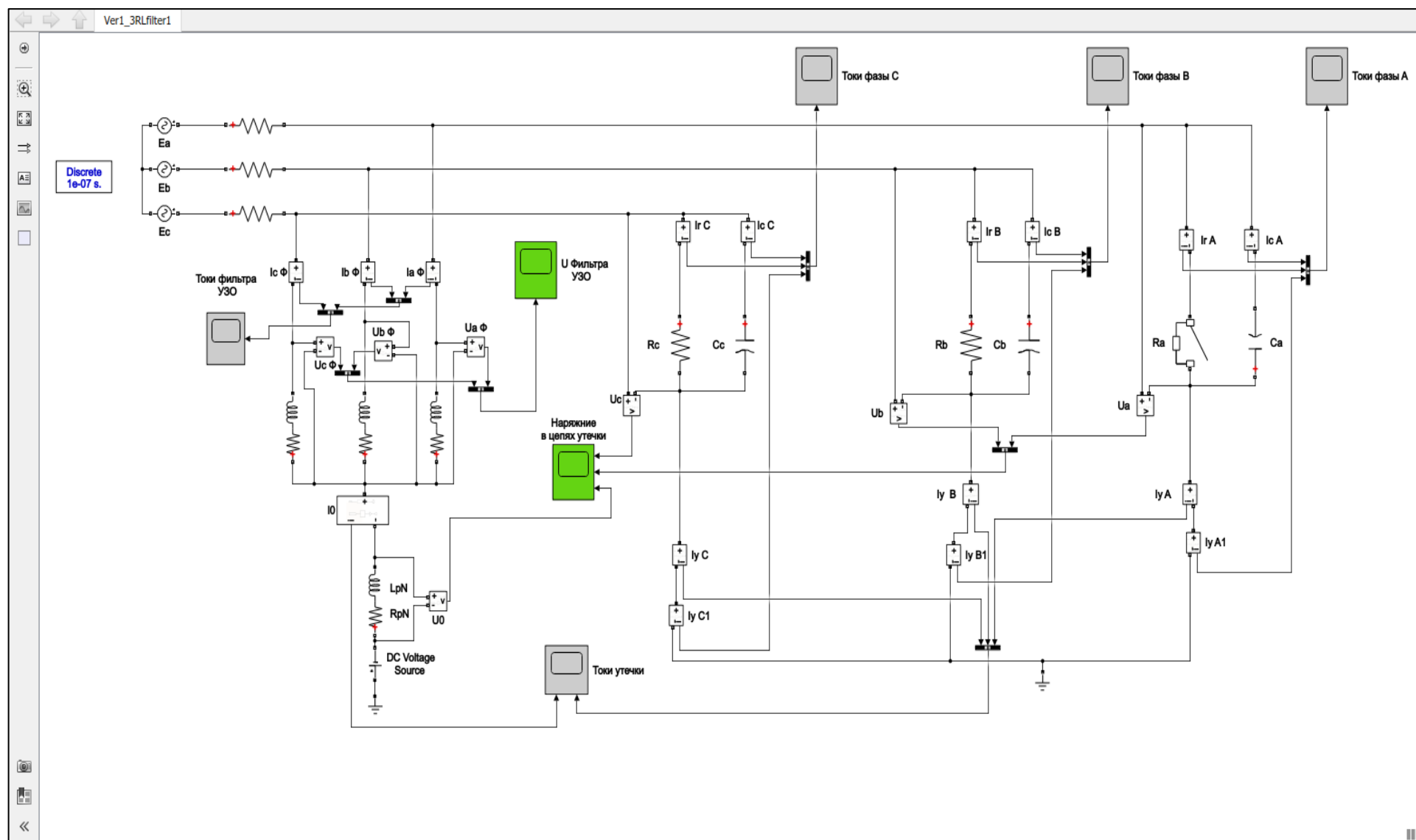


Рисунок 3.1 – Модель для исследования режимов утечки в изоляции сети с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО

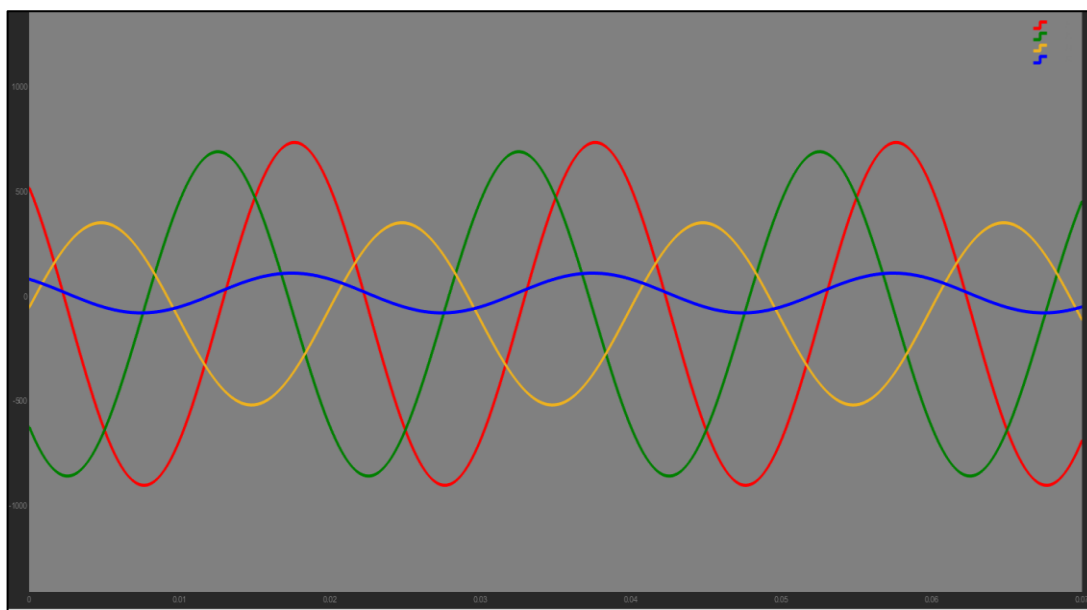


Рисунок 3.2 – Осциллограмма напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} , \dot{U}_0 в режиме однофазной утечки

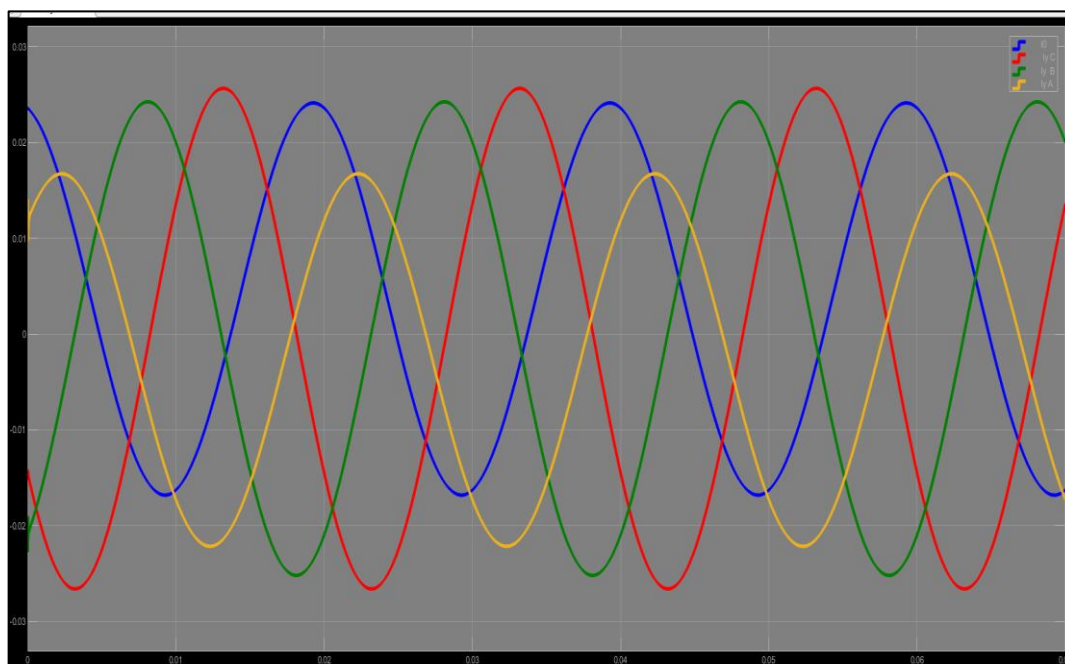


Рисунок 3.3 – Осциллограмма токов фаз и тока нулевой последовательности в режиме однофазной утечки

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены характерные осциллограммы изменения фазных напряжений и токов, а также напряжения и тока нулевой последовательности в цепи измерителя УЗО соответственно в режиме двухфазной утечки ($R_a = R_b = 31,5$ кОм, $R_c = 180$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,1$ мкФ)

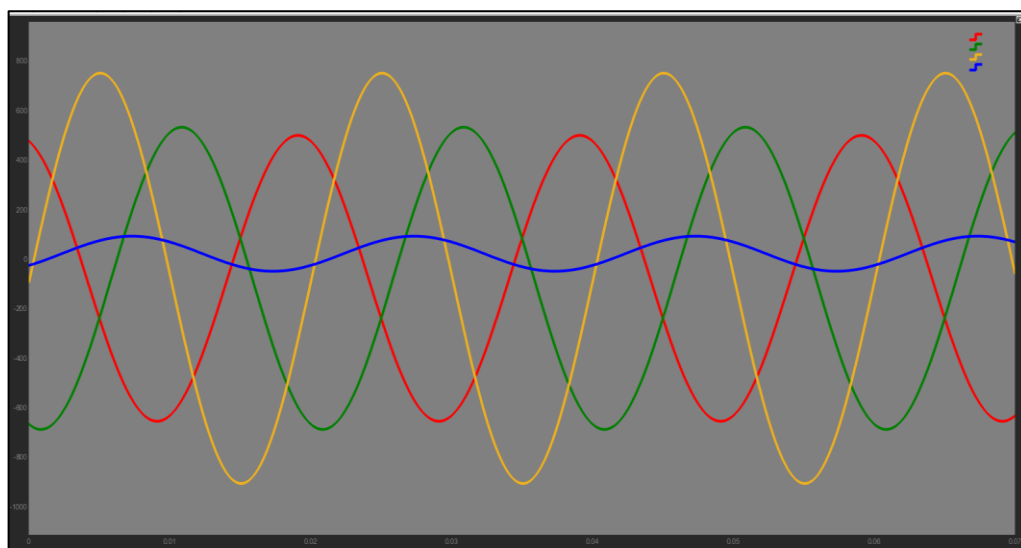


Рисунок 3.4 – Осциллограмма напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} , \dot{U}_0 в режиме двухфазной утечки тока

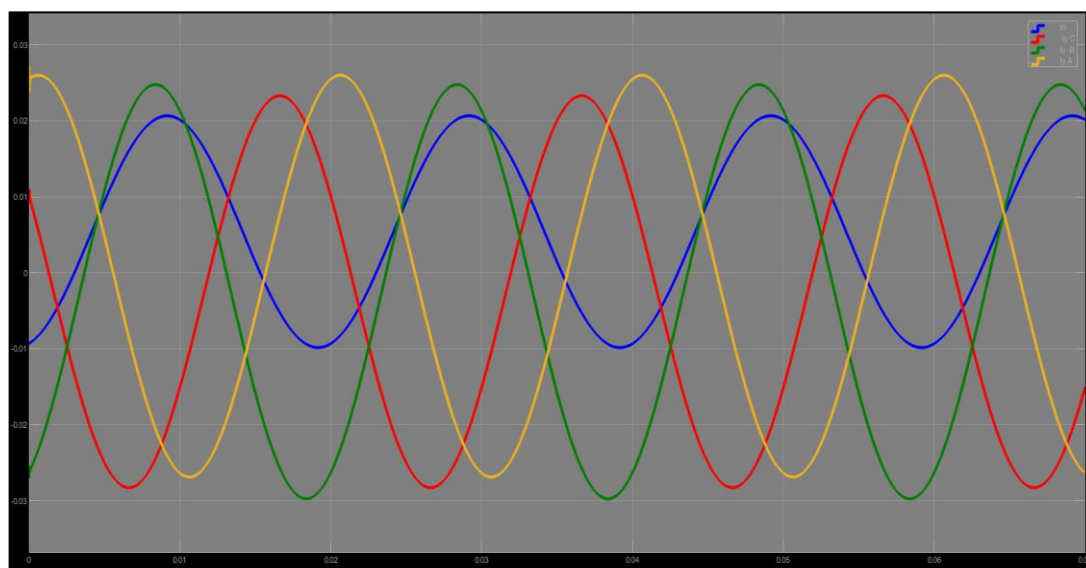


Рисунок 3.5 – Осциллограмма токов фаз и тока нулевой последовательности в режиме двухфазной утечки

Анализ представленных осциллограмм позволил сделать вывод о том, что в режиме однофазной утечки напряжение нулевой последовательности находится в противофазе с напряжением поврежденной фазы и синфазно напряжению неповрежденных фаз. При этом ток нулевой последовательности находится в противофазе току неповрежденных фаз и синфазен току в поврежденной фазе.

В режиме двухфазной утечки напряжение нулевой последовательности синфазно напряжению неповрежденной фазы. При этом ток нулевой последовательности находится в противофазе току неповрежденной фазы.

Это свидетельствует о том, что пространственная ориентация векторов напряжений и токов утечки зависит от режима утечки и соотношения параметров фазного сопротивления изоляции.

На рисунке 3.6 приведена векторная диаграмма фазных напряжений при возникновении однофазной утечки тока (снижение сопротивления фазы A) через изоляцию электрической сети с фазным напряжением $U_F = 660$ В ($U_L = 1140$ В) и изолированной нейтралью трансформатора. Характерной особенностью такой сети является высокое начальное сопротивление изоляции и малая суммарная протяженность гальванически связанных кабельных линий (короткая сеть). Данная диаграмма получается при условии, когда сопротивление двух фаз $R_B = R_C = 300$ кОм/фазу остается неизменным и происходит снижение активного сопротивления изоляции сети в фазе A до критического уровня $R_A = 10,5$ кОм/фазу.

Емкость изоляции фаз остается симметричной и неизменной $C_A = C_B = C_C = 0,1$ мкФ. В результате возникшей несимметрии появляется напряжение \dot{U}_0 , вектор которого опережает вектор фазного напряжения \dot{U}_{FA} на 90° . При этом напряжение в фазе A снижается до уровня $\dot{U}'_{FA} = 310$ В, а в фазах B и C увеличивается до $\dot{U}'_{FB} = 708,5$ В и $\dot{U}'_{FC} = 1049$ В, ННП составляет $\dot{U}_0 = 436,3$ В.

Анализ векторных диаграмм для режима однофазной утечки в электрических сетях малой протяженности ($C_l = 0,1$ мкФ/фазу) показал, что при изменении параметров активного сопротивления изоляции в диапазоне от 10,5 до 300 кОм/фазу напряжение в фазе A уменьшается на 38,8%, угол отклонения вектора напряжения \dot{U}'_{FA} от начального, соответствующего симметричному режиму, значения изменяется на опережающий его и отклоняется до $\varphi_A = 49^\circ$. Напряжение \dot{U}'_{FB} изменяется относительно своего начального значения в диапазоне от +5% до -16,8%, угол сдвига вектора напряжения φ_B незначительно изменяется от 218° до 255° . Напряжение \dot{U}'_{FC} увеличивается относительно своего начального значения до 56,7 % и практически приближается к линейному напряжению, угол сдвига фазы φ_C изменяется в очень малом диапазоне от 335° до

347°. Напряжение \dot{U}_0 изменяется в диапазоне от 35,6 В до 436,4 В, угол вектора φ_0 изменяется в диапазоне от 312° до 364°.

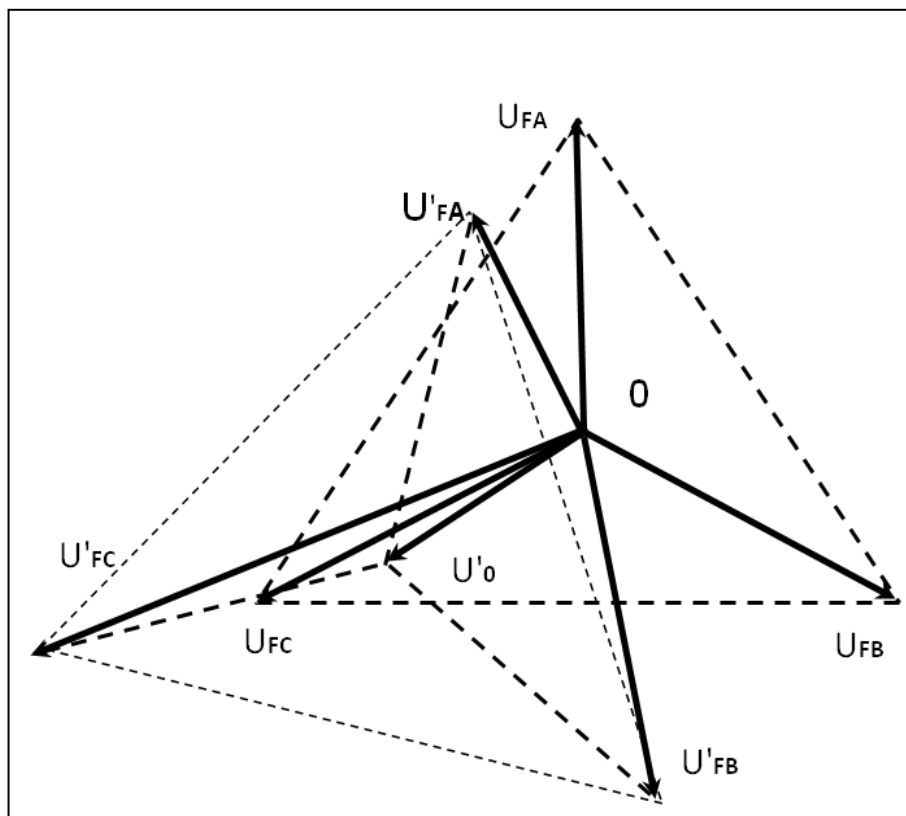


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма фазных напряжений в режиме однофазной утечки тока через изоляцию

На рисунке 3.7 приведена векторная диаграмма изменения фазных напряжений при возникновении двухфазной утечки тока через изоляцию электрической сети (снижение сопротивления изоляции в фазах A и C).

Данная диаграмма получается при условии, когда сопротивление фазы A остается неизменным $R_A = 300$ кОм, а происходит снижение активного сопротивления изоляции сети относительно земли в фазах B и C до уровня $R_B = R_C = 10,5$ кОм. Емкость изоляции фаз сети относительно земли остается также симметричной и неизменной $C_A = C_B = C_C = 0,1$ мкФ. В результате возникшей несимметрии появляется напряжение \dot{U}_0 , вектор которого уже отстает от вектора \dot{U}_{FA} . При этом напряжение в неповрежденной фазе A увеличивается до уровня $\dot{U}_{FA}'' = 916,2$ В, в поврежденной фазе B уменьшается до $\dot{U}_{FB}'' = 517,7$ В, а в

поврежденной фазе С уменьшается до $\dot{U}_{FC}'' = 635,6$ В. Напряжение смещения нейтрали составляет $\dot{U}_0 = 109,9$ В.

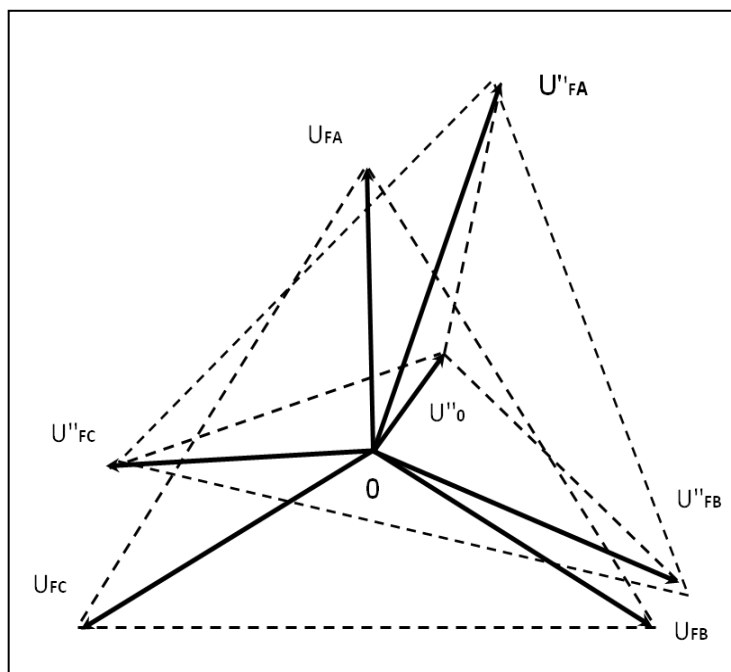


Рисунок 3.7 – Векторная диаграмма фазных напряжений в режиме двухфазной утечки тока через изоляцию

Анализ векторных диаграмм для режима двухфазной утечки в электрических сетях малой протяженности ($C_I = 0,1$ мкФ/фазу) показал, что при изменении параметров R_I в диапазоне от 10,5 до 300 кОм/фазу напряжение \dot{U}_{FA}'' увеличивается на 44,6%, угол φ_A сдвига от начального, соответствующего симметричному режиму, значения изменяется в достаточно узком диапазоне от 96° до $103,8^\circ$. Напряжение \dot{U}_{FB}'' увеличивается относительно начального значения на 12,8%, угол сдвига вектора напряжения φ_B изменяется от $192,7^\circ$ до $215,5^\circ$. Напряжение \dot{U}_{FC}'' уменьшается относительно своего начального значения на 31,7%, угол сдвига φ_C изменяется в диапазоне от $347,7^\circ$ до $367,7^\circ$.

Напряжение \dot{U}_0 изменяется в диапазоне от 23,5 В до 290,9 В, угол вектора φ_0 изменяется в диапазоне от 118° до 180° .

На рисунке 3.8 приведена совмещенная векторная диаграмма изменения напряжения нулевой последовательности \dot{U}_0 в режиме однофазной ($U'_{01} - U'_{06}$) и двухфазной утечки тока ($U''_{01} - U''_{06}$).

Параметры изоляции:

– для режима однофазной утечки тока: $R_A = 10,5 \text{ кОм (const)}$;

$R_B = R_C = 300 \text{ кОм (const)}$; $C_I = 0,1 - 3,0 \text{ мкФ (var)}$;

– для режима однофазной утечки тока: $R_A = 300 \text{ кОм (const)}$

$R_B = R_C = 10,5 \text{ кОм (const)}$; $C_I = 0,1 - 3,0 \text{ мкФ (var)}$.

Анализ совмещенной диаграммы показал, что в режиме однофазной утечки по мере увеличения емкости изоляции сети относительно земли напряжение U'_0 уменьшается от 436,3 В до 76,4 В, а угол сдвига φ'_0 изменяется от $327,3^\circ$ до $373,2^\circ$. В режиме двухфазной утечки напряжение U''_0 уменьшается от 290,9 В до 38,5 В, а угол сдвига φ''_0 изменяется соответственно от 121° до $182,9^\circ$.

В результате анализа установлено, что режиме однофазной утечки при изменении параметров изоляции в диапазонах $R_I = 10,5 - 300 \text{ кОм}$ и $C_I = 0,1 - 3,0 \text{ мкФ}$ напряжения фаз изменяются в диапазонах соответственно $\dot{U}'_{FA} = 425 - 687 \text{ В}$, $\dot{U}'_{FB} = 642,9 - 1049 \text{ В}$, $\dot{U}'_{FC} = 562 - 708,5 \text{ В}$. Углы сдвига фаз изменяются в диапазонах: $\varphi_A = 72,3^\circ - 98^\circ$, $\varphi_B = 218,49^\circ - 255,7^\circ$, $\varphi_C = 335,9^\circ - 353,17^\circ$. Напряжение \dot{U}_0 изменяется в диапазоне $\dot{U}'_0 = 324,6 - 611,2 \text{ В}$ и приближается к фазному, угол сдвига $\varphi_0 = 312,9^\circ - 378,9^\circ$.

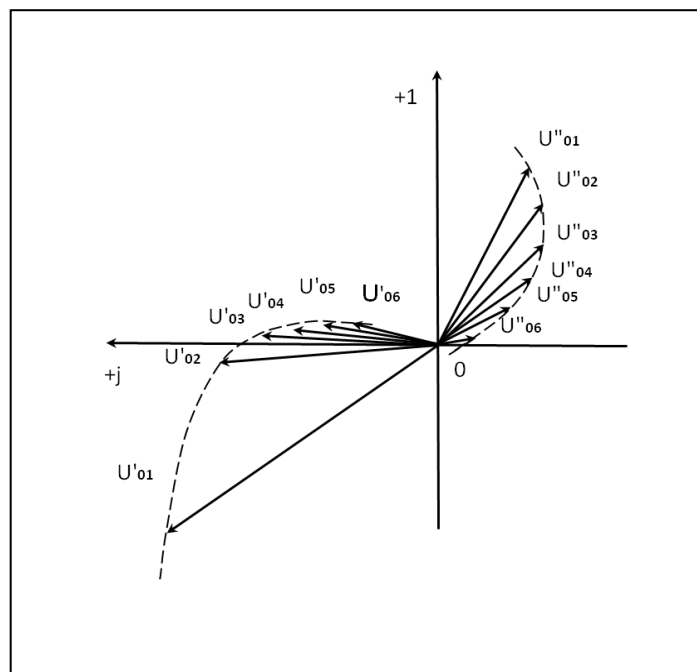


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма соотношений напряжения нулевой последовательности \dot{U}_0 в режимах однофазной и двухфазной утечек тока

В режиме двухфазной утечки при изменении параметров изоляции в диапазоне $R_I = 10,5 - 300$ кОм и $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ напряжения фаз изменяются в диапазонах соответственно $\dot{U}_{FA}'' = 631,3 - 904,4$ В, $\dot{U}_{FB}'' = 586,7 - 750,3$ В, $\dot{U}_{FC}'' = 427,2 - 626,8$ В. Углы сдвига фаз изменяются в диапазоне: $\varphi_A = 83,7^\circ - 103,8^\circ$, $\varphi_B = 189,7^\circ - 218,4^\circ$, $\varphi_C = 344,5^\circ - 367,5^\circ$. Напряжение смещения нейтрали \dot{U}_0 изменяется в диапазоне $\dot{U}_0'' = 14 - 291$ В, угол сдвига $\varphi_0 = 120,9^\circ - 186,9^\circ$.

Сравнительный анализ векторных диаграмм однофазного и двухфазного режимов утечки и их сопоставление между собой позволил сделать следующие выводы.

1. В режиме однофазной утечки тока через фазу A напряжение в фазе B и угол фазного сдвига φ_B незначительно изменяются относительно значений, соответствующих симметричному режиму. Напряжение в фазе C резко увеличивается и приближается к линейному значению, при этом угол фазного сдвига φ_C вектора напряжения \dot{U}_{FC} практически не изменяется.

2. В режиме двухфазной утечки тока напряжение в неповрежденной фазе \dot{U}_{FA} резко увеличивается и приближается к линейному значению, в то время как напряжение \dot{U}_0 увеличивается и приближается к фазному, но при этом опережает вектор напряжения \dot{U}_{FA} в силу емкостного характера изоляции.

3. В режиме двухфазной утечки тока напряжение в фазах B и C , а также соответствующие им и углы фазного сдвига φ_B и φ_C незначительно изменяются относительно значений, соответствующих симметричному режиму, а при емкостях более 0,5 мкФ, остаются практически неизменными.

5. 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.

6. Полученные в результате анализа данные о характере режимов однофазной и двухфазной утечки позволяют выполнить количественную и качественную оценку несимметрии параметров изоляции.

3.3 Результаты исследования и оценка уровня несимметрии фазных напряжений при различных режимах утечки тока через изоляцию

По результатам обработки данных исследований несимметричных режимов утечки, установлены зависимости, характеризующие влияние активного сопротивления и емкости изоляции сети на изменение фазных напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} и напряжения нулевой последовательности \dot{U}_0 .

На рисунке 3.9 приведены зависимости $U_{FA} = f(C_I)$, $U_{FB} = f(C_I)$, $U_{FC} = f(C_I)$, $U_0 = f(C_I)$, соответствующие режиму однофазной утечки тока, при условии постоянства величин активных сопротивлений ($R_A = 10,5$ кОм, $R_B = R_C = 300$ кОм) и изменении емкости фаз сети относительно земли в диапазоне $0,1 - 3,0$ мкФ.

Анализ зависимостей показал, что в режиме однофазной утечки тока величина фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, при достаточно высоком начальном уровне активного сопротивления изоляции, в значительной степени определяются емкостью изоляции сети относительно земли.

При увеличении емкости изоляции сети в диапазоне $0,1 - 0,25$ мкФ/фазу (короткие сети) \dot{U}_{FA} возрастает от 443,8 В до 683,5 В. Напряжение \dot{U}_{FB} снижается от 708,5 В до 553,7 В (при $C_I = 0,15$ мкФ/фазу) и затем возрастает до 586,2 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 1048,9 В до 776,5 В. Напряжение \dot{U}_0 уменьшается от 436,6,3 В до 161,2 В (63%).

При увеличении емкости изоляции сети в диапазоне $C_I = 0,25 - 0,5$ мкФ/фазу (сети средней протяженности) \dot{U}_{FA} падает от 683,5 В до 679,6 В. Напряжение \dot{U}_{FB} увеличивается от 586,2 В до 626 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 776,5 В до 722,6 В. Напряжение \dot{U}_0 уменьшается от 161,2 В до 100,4 В (37,7%).

При увеличении емкости изоляции сети в диапазоне $C_I = 0,5 - 1$ мкФ/фазу (сети большой протяженности) \dot{U}_{FA} снижается от 679,6 В до 658,6 В. Напряжение \dot{U}_{FB} увеличивается от 626 В до 645,9 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 722,6 В до 676,6 В. Напряжение \dot{U}_0 уменьшается от 100,4 В до 78,0 В (22,3%).

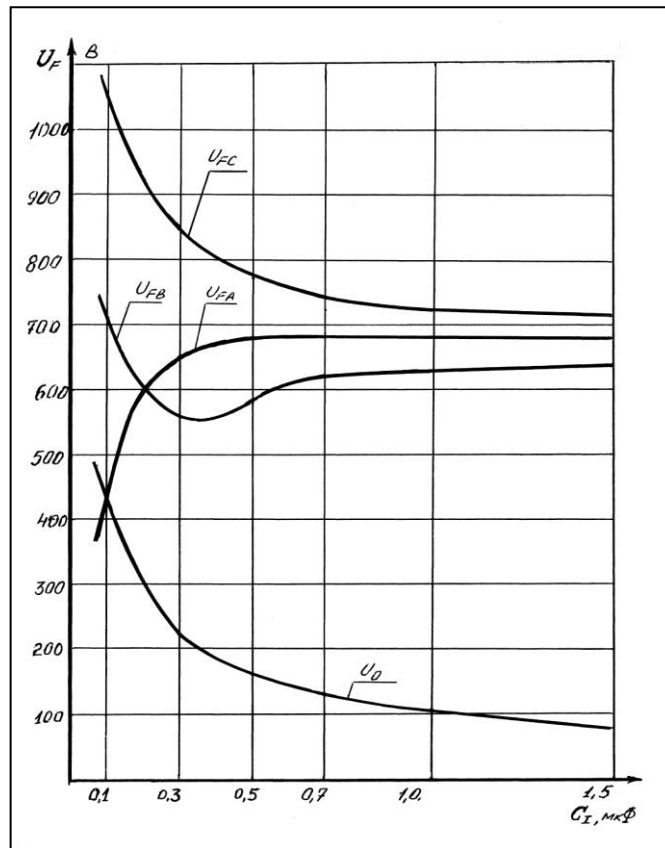


Рисунок 3.9 – Зависимости напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} , \dot{U}_0 от емкости изоляции C_I в режиме однофазной утечки тока: $R_I = const$, ($R_A = 10,5 \text{ кОм}$, $R_B = R_C = 300 \text{ кОм}$)

В режиме однофазной утечки тока при неизменных параметрах активного сопротивления изоляции сети степень несимметрии фазных напряжений определяется не только соотношением активных сопротивлений фаз сети, но и в значительной мере величиной емкости изоляции.

Полученные в результате анализа коэффициенты несимметрии фазных напряжений в режиме однофазной утечки тока через изоляцию приведены в таблице 3.1.

Наибольшая несимметрия напряжений характерна для сетей малой протяженности (короткие сети), при этом коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,585 до 0,017. Для сетей средней протяженности коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,245 до 0,013. Для сетей большой протяженности несимметрия фазных напряжений незначительна, коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,134 до 0,002.

Таблица 3.1 – Коэффициенты несимметрии фазных напряжений k_{NU} в режиме однофазной утечки тока через изоляцию

R_A , кОм	$R_B = R_C$, кОм	$C_A = C_B = C_C$, мкФ						
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	3,0
10,5	31,5	0,490	0,225	0,171	0,129	0,097	0,060	0,031
	60	0,539	0,289	0,212	0,159	0,113	0,077	0,035
	120	0,570	0,322	0,233	0,176	0,126	0,085	0,040
	180	0,580	0,336	0,240	0,180	0,131	0,088	0,041
	300	0,585	0,344	0,245	0,136	0,134	0,108	0,045
31,5	60	0,167	0,071	0,040	0,027	0,021	0,017	0,006
	120	0,255	0,112	0,068	0,047	0,030	0,023	0,007
	180	0,289	0,127	0,076	0,053	0,035	0,025	0,008
	300	0,317	0,138	0,083	0,045	0,039	0,027	0,009
60	120	0,113	0,037	0,026	0,015	0,013	0,012	0,006
	180	0,156	0,052	0,032	0,017	0,016	0,014	0,005
	300	0,185	0,064	0,036	0,025	0,023	0,017	0,004
120	180	0,047	0,020	0,017	0,015	0,014	0,013	0,003
	300	0,072	0,027	0,023	0,018	0,017	0,016	0,002

На рисунке 3.10 приведены зависимости $U_{FA} = f(C_I)$, $U_{FB} = f(C_I)$, $U_{FC} = f(C_I)$, $U_0 = f(C_I)$, соответствующие режиму двухфазной утечки тока, при условии постоянства величин активных сопротивлений $R_A = 300$ кОм, $R_B = R_C = 10,5$ кОм и изменении емкости фаз сети относительно земли в диапазоне $C_A = C_B = C_C = 0,1 - 1,5$ мкФ.

Анализ представленных зависимостей показал, что в режиме двухфазной утечки тока величина фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, при высоком начальном уровне активного сопротивления изоляции, в значительной степени определяются емкостью изоляции сети относительно земли. Однако характер изменения напряжений качественно и количественно отличается от режима однофазной утечки тока.

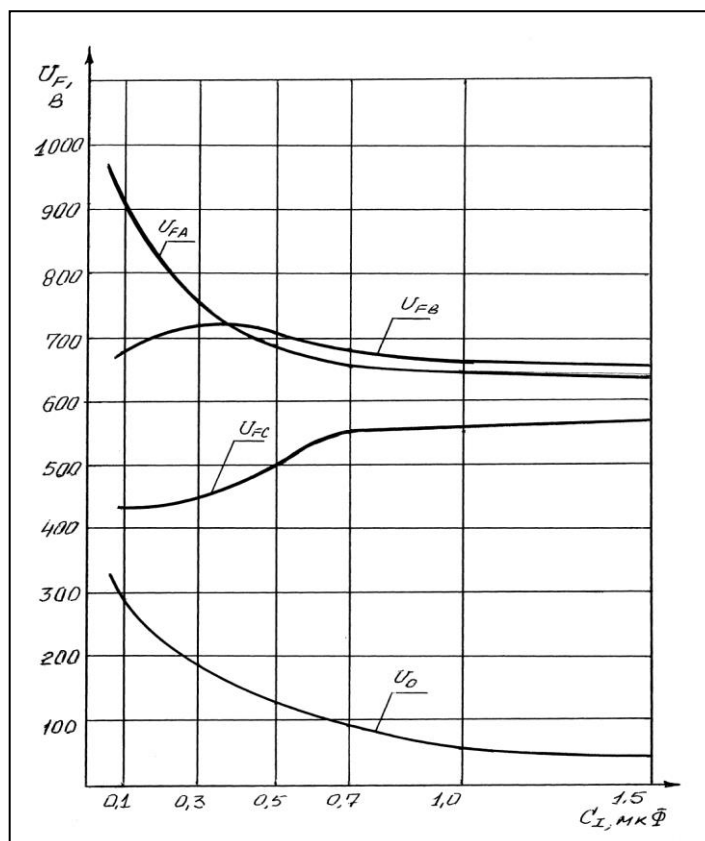


Рисунок 3.10 – Зависимости напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} , \dot{U}_0 от емкости изоляции C_I в режиме двухфазной утечки тока: $R_I = const$, ($R_A = 10,5 \text{ кОм}$, $R_B = R_C = 300 \text{ кОм}$)

В режиме двухфазной утечки тока при неизменных параметрах активного сопротивления изоляции сети степень несимметрии фазных напряжений зависит от соотношения активных и емкостных составляющих сопротивления изоляции. При этом, в заданном диапазоне указанных величин при емкостях менее 0,5 мкФ/фазу несимметрия фазных напряжений при двухфазной утечке выражена в большей степени, чем при аналогичных параметрах изоляции в режиме однофазной утечки. При емкостях изоляции сети относительно земли более 1 мкФ/фазу несимметрия активных сопротивлений изоляции практически не проявляется, т.к. в этом случае емкостное сопротивление существенно ниже активного сопротивления фаз. В этом случае ток утечки можно считать емкостным.

Полученные в результате анализа данных математического моделирования коэффициенты несимметрии фазных напряжений в режиме двухфазной утечки тока через изоляцию приведены в таблице 3.2.

Наибольшая несимметрия напряжений характерна для сетей малой протяженности, при этом коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,527 до 0,049. Для сетей средней протяженности коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,291 до 0,044. Для сетей большой протяженности коэффициент несимметрии k_{NU} изменяется от 0,174 до 0,042.

На рисунке 3.11 приведены зависимости $U_{FA} = f(R_I)$, $U_{FB} = f(R_I)$, $U_{FC} = f(R_I)$, $U_0 = f(R_I)$, соответствующие режиму однофазной утечки тока, при изменении активного сопротивления поврежденной фазы в диапазоне $R_A = 10,5 - 300$ кОм, а также постоянстве емкости фаз сети относительно земли ($C_I = 0,1$ мкФ/фазу) и активных сопротивлений неповрежденных фаз $R_B = R_C = 300$ кОм).

Таблица 3.2 – Коэффициенты несимметрии фазных напряжений k_{NU} в режиме двухфазной утечки тока через изоляцию

R_A , кОм	$R_B = R_C$, кОм	$C_A = C_B = C_C$, мкФ/фазу					
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5
300	10,5	0,527	0,412	0,291	0,229	0,174	0,127
	31,5	0,384	0,177	0,120	0,093	0,079	0,070
	60	0,224	0,092	0,075	0,059	0,057	0,061
	120	0,106	0,068	0,053	0,052	0,047	0,046
	180	0,065	0,060	0,049	0,048	0,044	0,042
180	10,5	0,516	0,403	0,269	0,224	0,171	0,125
	31,5	0,357	0,165	0,111	0,091	0,078	0,071
	60	0,190	0,086	0,065	0,058	0,055	0,053
	120	0,073	0,061	0,058	0,049	0,048	0,047
120	10,5	0,502	0,392	0,275	0,218	0,166	0,122
	31,5	0,325	0,151	0,102	0,081	0,058	0,055
	60	0,149	0,077	0,066	0,055	0,052	0,050
60	10,5	0,460	0,360	0,251	0,199	0,152	0,112
	31,5	0,226	0,122	0,074	0,063	0,062	0,061

Анализ представленных зависимостей показал, что в режиме однофазной утечки тока величина фазных напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}$ и напряжения смещения нейтрали \dot{U}_0 , при достаточно низком уровне емкости изоляции фаз сети, в значительной степени определяются соотношением активных сопротивлений неповрежденных фаз и сопротивлением фазы, в которой произошла утечка тока.

При изменении сопротивления R_A в диапазоне $R_A = 10,5 - 31,5$ кОм/фазу напряжение \dot{U}_{FA} возрастает от 443,8 В до 629,9 В. Напряжение \dot{U}_{FB} снижается от 708,5 В до 562,7 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 1048,9 В до 824 В. Напряжение U_0 уменьшается от 436,6,3 В до 199,8 В (54,2%).

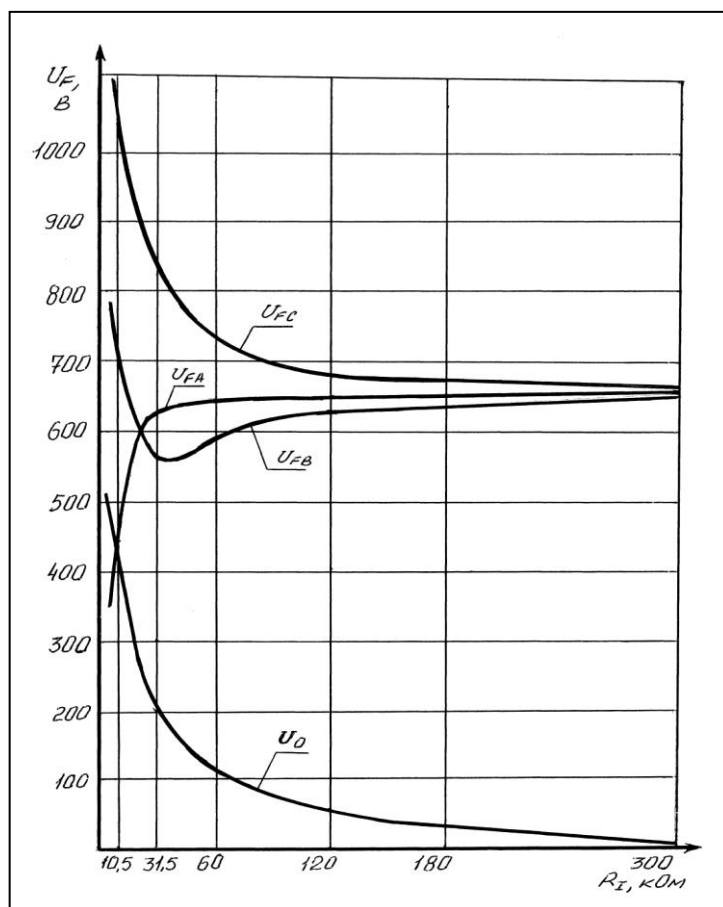


Рисунок 3.11 – Зависимости напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}, \dot{U}_0$ в режиме однофазной утечки тока: $C_A = C_B = C_C = 0,1$ мкФ, $R_B = R_C = 300$ кОм, $R_A = 10,5 - 300$ кОм

При изменении сопротивления R_A в диапазоне $R_A = 31,5 - 120$ кОм/фазу \dot{U}_{FA} возрастает от 629,9 В до 657,9 В. Напряжение \dot{U}_{FB} увеличивается от 562,7 В до

631 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 824 В до 678,9 В). Напряжение U_0 уменьшается от 199,8 В до 55,8 В (31,9%).

При изменении активного сопротивления изоляции R_A в диапазоне $R_A = 120 - 300$ кОм/фазу напряжение \dot{U}_{FA} возрастает от 657,9 В до 660 В. Напряжение \dot{U}_{FB} увеличивается от 631 В до 658 В. Напряжение \dot{U}_{FC} снижается от 678,9 В до 663 В. Напряжение смещения нейтрали U_0 уменьшается от 55,3 В до 8,4 В (84,8%).

Таким образом, в режиме однофазной утечки тока при низких емкостных сопротивлениях изоляции сети (менее 0,15 мкФ/фазу) степень несимметрии фазных напряжений определяется не только соотношением активных сопротивлений фаз сети, но и в значительной мере величиной уровня этих сопротивлений в режиме, предшествующем возникновению утечки.

В большей степени несимметрия фазных напряжений проявляется при низких активных сопротивлениях в цепи утечки $R_y = R_A < 31,5$ кОм. При сопротивлении в цепи утечки R_y более 120 кОм несимметрия фазных напряжений проявляется незначительно и не оказывает существенного влияния на уровень фазных напряжений в сети.

На рисунке 3.12 приведены зависимости $U_{FA} = f(R_I)$, $U_{FB} = f(R_I)$, $U_{FC} = f(R_I)$, $U_0 = f(R_I)$, соответствующие режиму двухфазной утечки тока, при изменении активного сопротивления поврежденных фаз в диапазоне $R_B = R_C = 10,5 - 180$ кОм, а также постоянстве емкости фаз сети относительно земли ($C_I = 0,1$ мкФ/фазу) и активного сопротивлений неповрежденной фазы $R_A = 300$ кОм.

Анализ представленных зависимостей показал, что в режиме двухфазной утечки тока величина фазных напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} и напряжения смещения нейтрали \dot{U}_0 , при достаточно низком уровне емкости изоляции фаз сети, также как и в режиме однофазной утечки, определяются соотношением активных сопротивлений неповрежденных фаз и сопротивлением фазы, в которой произошла утечка тока. Однако характер изменения фазных напряжений имеет принципиальные отличия, как в качественном, так и в количественном выражении.

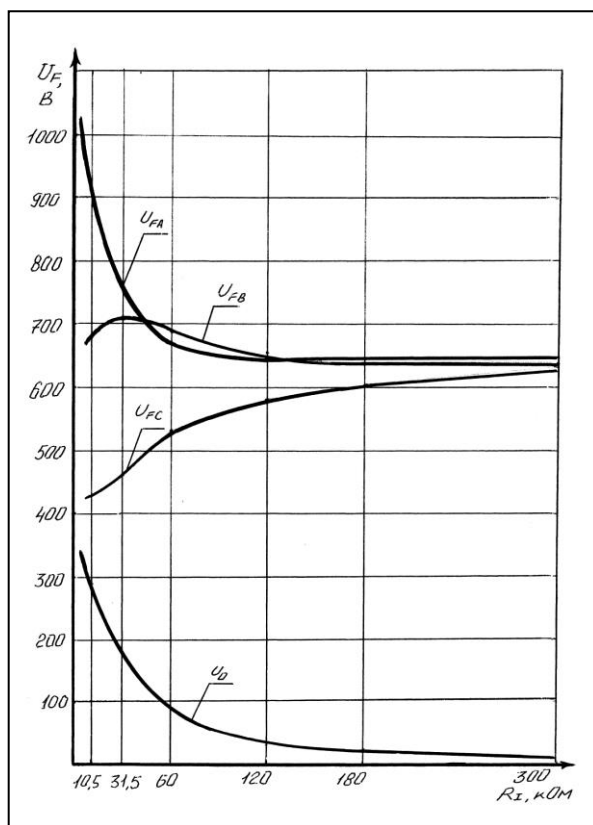


Рисунок 3.12 – Зависимости напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}, \dot{U}_0$ в режиме двухфазной утечки тока: $C_A = C_B = C_C = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_A = 300 \text{ кОм}$, $R_B = R_C = 10,5 - 180 \text{ кОм}$

При изменении сопротивления в диапазоне $R_B = R_C = 31,5 - 120 \text{ кОм/фазу}$ \dot{U}_{FA} уменьшается от 748 В до 643,4 В. Напряжение \dot{U}_{FB} уменьшается от 712,5 В до 650,5 В. Напряжение \dot{U}_{FC} увеличивается от 460,8 В до 581,3 В. Напряжение U_0 уменьшается от 173,4 В до 39,3 В (77,3%).

При изменении сопротивления в диапазоне $R_B = R_C = 120 - 300 \text{ кОм/фазу}$ \dot{U}_{FA} возрастает от 643,4 В до 660 В. Напряжение \dot{U}_{FB} остается увеличивается от 650,3 В до 658 В. Напряжение \dot{U}_{FC} увеличивается от 581,3 В до 645,6 В. Напряжение U_0 уменьшается от 39,93 В до 6,5 В (83,7%).

В режиме двухфазной утечки тока при низких емкостных сопротивлениях изоляции сети (менее 0,25 мкФ/фазу) степень несимметрии фазных напряжений определяется, также как и в режиме однофазной утечки, не только соотношением активных сопротивлений фаз сети, но и величиной уровня этих сопротивлений в режиме, предшествующем возникновению утечки.

На рисунке 3.13 приведены зоны изменения фазных напряжений \dot{U}_{FA} , \dot{U}_{FB} , \dot{U}_{FC} и \dot{U}_0 при различных сочетаниях $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу и $C_I = 0,5 - 1$ мкФ/фазу. Диапазон изменения указанных величин при соответствующем изменении выделен в виде заштрихованных зон.

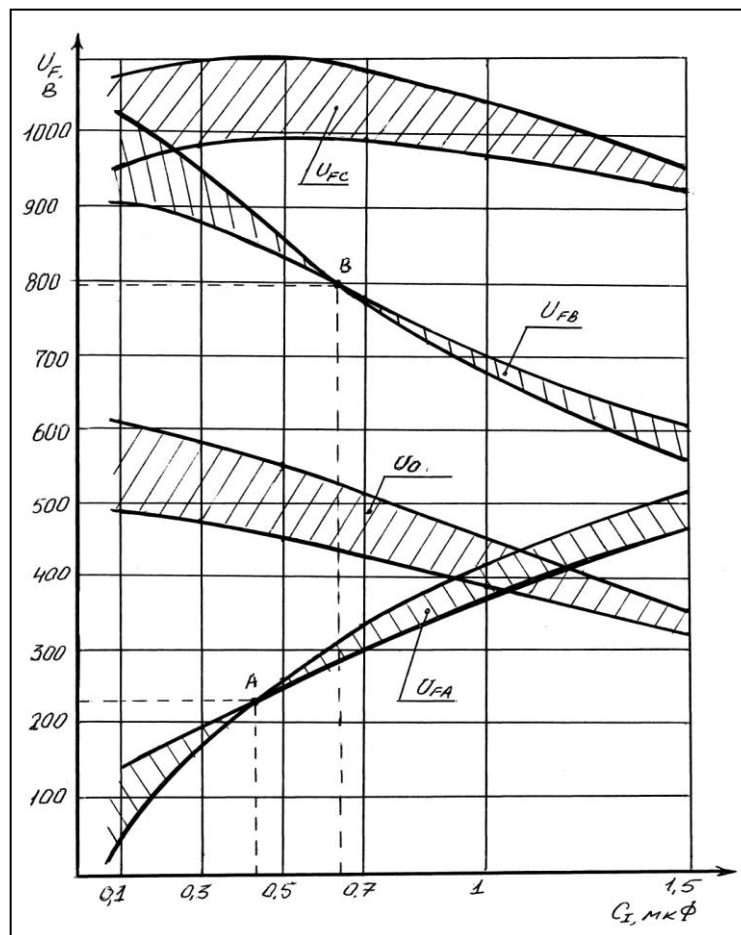


Рисунок 3.13 – Зоны изменения U_{FA} , U_{FB} , U_{FC} и U_0 при $R_I = 0,5 - 300$ кОм и $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ

Несмотря на нелинейный характер изменения фазных напряжений при различных комбинациях активного и емкостного сопротивлений изоляции, \dot{U}_0 изменяется фактически по линейному закону. Наибольший диапазон изменения характерен для фаз A и B (с ростом емкости напряжение в фазе A увеличивается до фазных значений, а в фазе B уменьшается от линейных до фазных значений). Напряжение фазы C , с ростом емкости, изменяется гораздо в меньшей степени. При $C_I = 0,43$ мкФ/фазу напряжение \dot{U}_{FA} не зависит от величины активного сопротивления R_I . Аналогично при $C_I = 0,65$ мкФ/фазу напряжение \dot{U}_{FB} не зависит

от величины активного сопротивления R_I . Таким образом, при указанных емкостях и только в двух соответствующих фазах сети возможно достижение резонанса при включении индуктивного сопротивления в нейтраль трансформатора.

По этой причине в низковольтных электрических сетях в заданном диапазоне изменения активных и емкостных сопротивлений изоляции фаз сети относительно земли возможен только частичный (неявно выраженный резонанс напряжений).

Анализ режимов утечки позволил сделать следующие выводы.

1. В режиме однофазной утечки наибольшая степень несимметрии фазных напряжений характерна для сетей малой протяженности ($C_I < 0,25$ мкФ/фазу).

2. При емкости изоляции более 0,5 мкФ/фазу подземная электрическая сеть опасна при любом уровне активного сопротивления изоляции. При этом несимметрия фазных напряжений значительно снижена, т.к. уровень тока утечки определяется в основном его емкостной составляющей.

3. Для режима двухфазной утечки несимметрия фазных напряжений выражена в меньшей степени, чем при однофазной, однако при этом качественно изменяется характер распределения и изменения фазных напряжений.

4. При оценке несимметрии в качестве критерия наиболее удобно использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений k_{NU} .

5. При различных комбинациях активного и емкостного сопротивлений изоляции, напряжение смещения нейтрали \dot{U}_0 изменяется фактически по линейному закону. При емкости изоляции сети $C_I = 0,45$ мкФ/фазу напряжение \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 активного сопротивления R_I .

6. Полученные результаты положены в основу метода оценки степени опасности режимов утечки в подземных электрических сетях и разработку способов и средств пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостных токов утечки [276].

3.4. Анализ влияния низкочастотной поляризации на токи утечки через изоляцию в подземной электрической сети

Анализ исследований [16, 42, 49, 91, 160, 255, 269, 290] влияния процесса низкочастотной поляризации на величину утечки тока через изоляцию выявил ряд существенных сложностей как в аналитическом подходе к решению данной задачи, так и в последующей реализации способов и средств контроля состояния изоляции электрической сети. Это обусловлено тем, что сам процесс утечки определяется факторами, количественная оценка которых затруднена отсутствием средств прямого контроля токов сквозной проводимости, а также тока абсорбции, величина которого зависит от релаксационного вида поляризации и перераспределения свободных зарядов в объеме диэлектрика.

С учетом того, что абсорбционные токи при переменном напряжении протекают в течение всего времени нахождения диэлектрика в электрическом поле во второй главе предложен метод определения тока утечки на основе учета сопротивления ветви $R_{аб}$, $C_{аб}$ в схеме замещения параметров фазной изоляции как составляющей T_{FI} , определяемой по формуле (2.10).

При анализе электромагнитного переходного процесса в изоляции непосредственный учет дифференциального звена ($R_{аб}$, $X_{аб}$) приводит к существенному усложнению математической модели.

На основании расчетных соотношений (2.2), (2.6), (2.7) и (2.10) построены параметрические зависимости: электромагнитной постоянной T_I при различных комбинациях R_I и C_I ; постоянных T_{IH} электромагнитных колебаний в контурах изоляции с учетом человека; постоянных T_{IF} электромагнитных колебаний в контурах изоляции с учетом активного сопротивления току абсорбции.

Визуализация и верификация результатов проводилась на имитационной модели, приведенной на рисунке 3.14.

На рисунке 3.15 приведены параметрические зависимости электромагнитной постоянной затухания колебаний в RC -контурах изоляции фаз сети относительно земли.

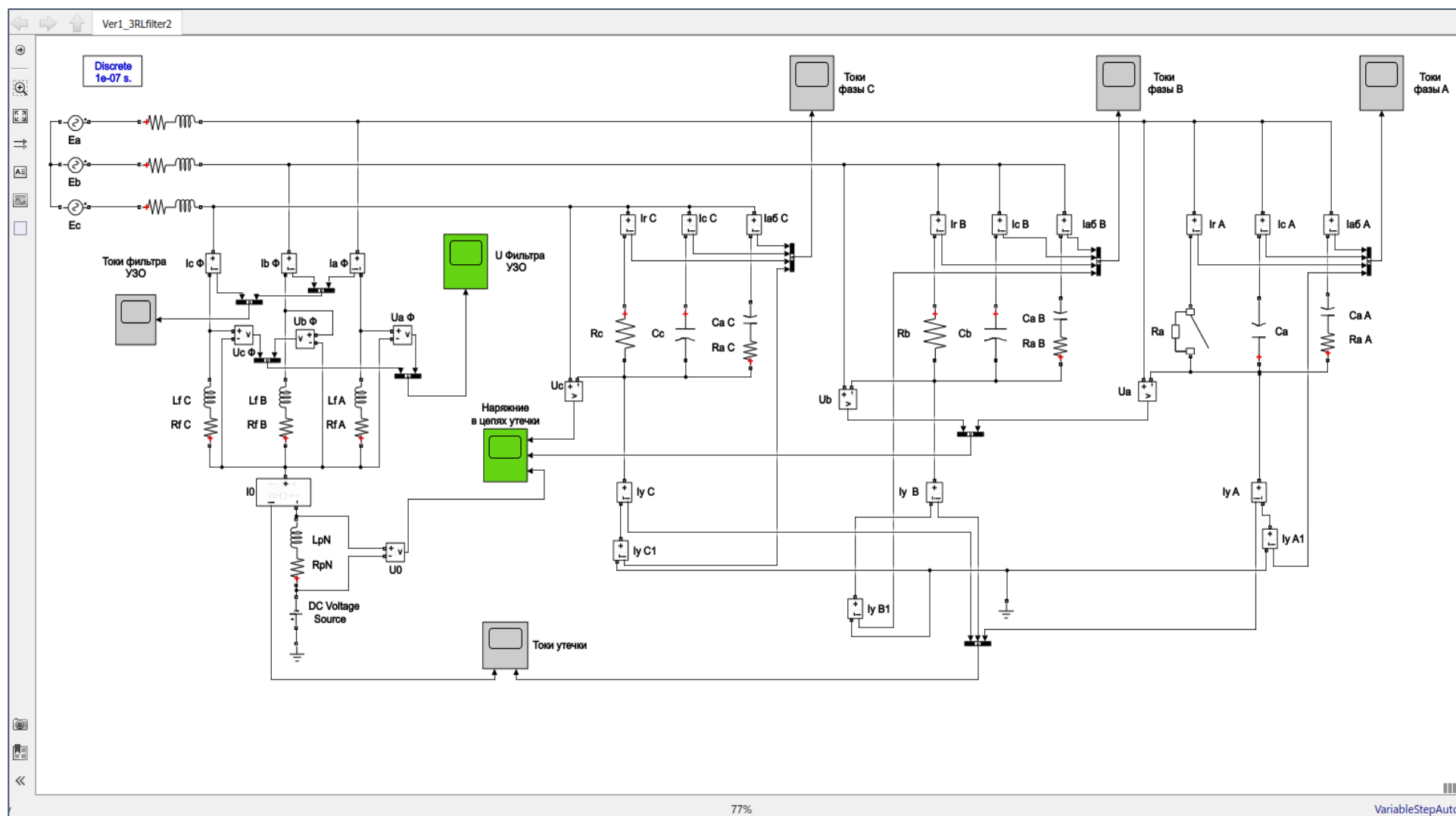


Рисунок 3.14 – Модель для исследования режимов утечки с учетом низкочастотной поляризации в изоляции сети с 3RL-фильтром присоединения УЗО

Амплитуда и скорость затухания электромагнитных колебаний в значительной степени зависят от сочетания активного и емкостного сопротивлений фаз электрической сети. Наибольшие показатели приходятся на сопротивления изоляции до 60 мкФ/фазу при емкостях менее 0,3 мкФ/фазу. В диапазоне активного сопротивления $R_I = 60 - 300$ кОм/фазу и емкостях более 0,5 мкФ/фазу значения постоянных T_I менее 0,1 рад и стремятся к нулю.

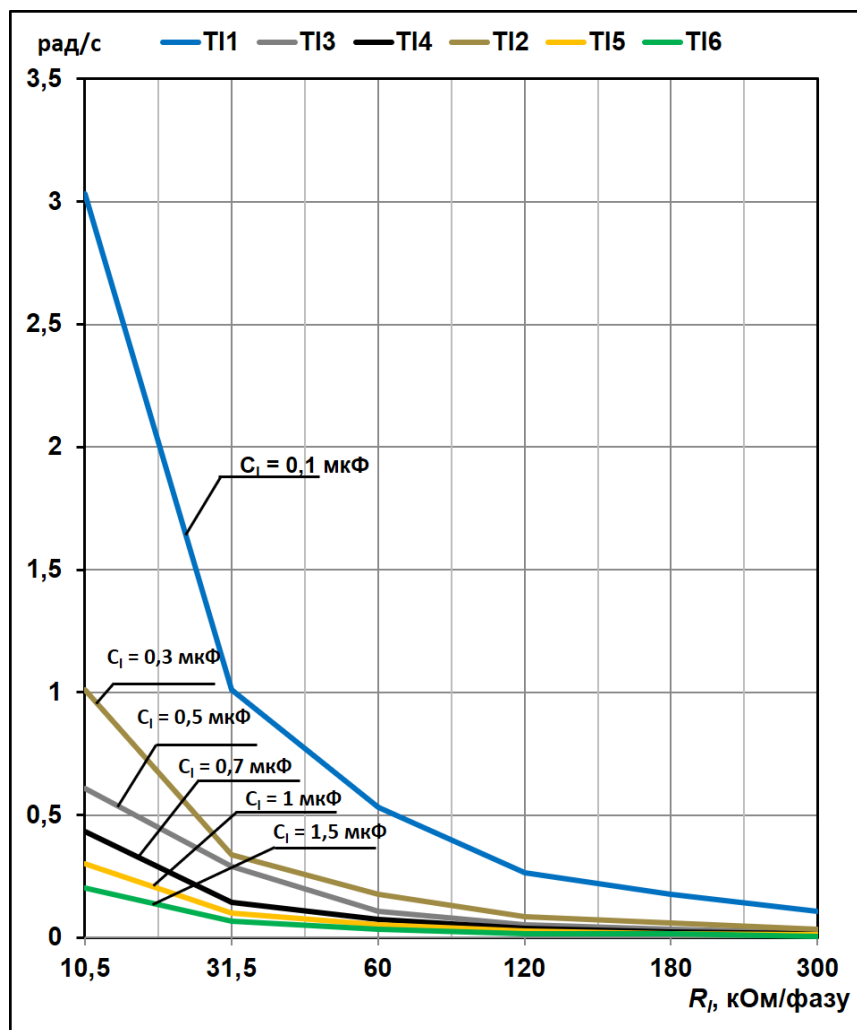


Рисунок 3.15 – Параметрические зависимости электромагнитной постоянной T_I при различных комбинациях активного сопротивления R_I и емкости C_I изоляции

При больших емкостях активная составляющая не оказывает заметного влияния на характер затухания колебаний частоты в контурах фазной изоляции, утечка тока носит чисто емкостной характер и защитные свойства изоляции резко снижаются. По сути, утечка тока в фазе не приводит к существенному снижению

ее фазного напряжения за счет достаточно высокого зарядного потенциала емкости изоляции.

На рисунке 3.16 приведены параметрические зависимости электромагнитных постоянных T_{IH} затухания колебаний в контуре изоляции с учетом параметров тела человека.

Анализ показывает, что в данном случае значения постоянной T_{IH} на порядок превышает аналогичные значения постоянной T_I , приведенные на рисунке 3.15. Наибольшее приращение значений T_{IH} происходит при величинах сопротивления изоляции менее 31,5 кОм/фазу и емкости изоляции менее 0,3 мкФ/фазу. При увеличении сопротивления изоляции $R_I > 31,5$ кОм/фазу электромагнитные постоянные T_{IH} практически не изменяются, их уровень определяется только величиной емкости фазной изоляции C_I .

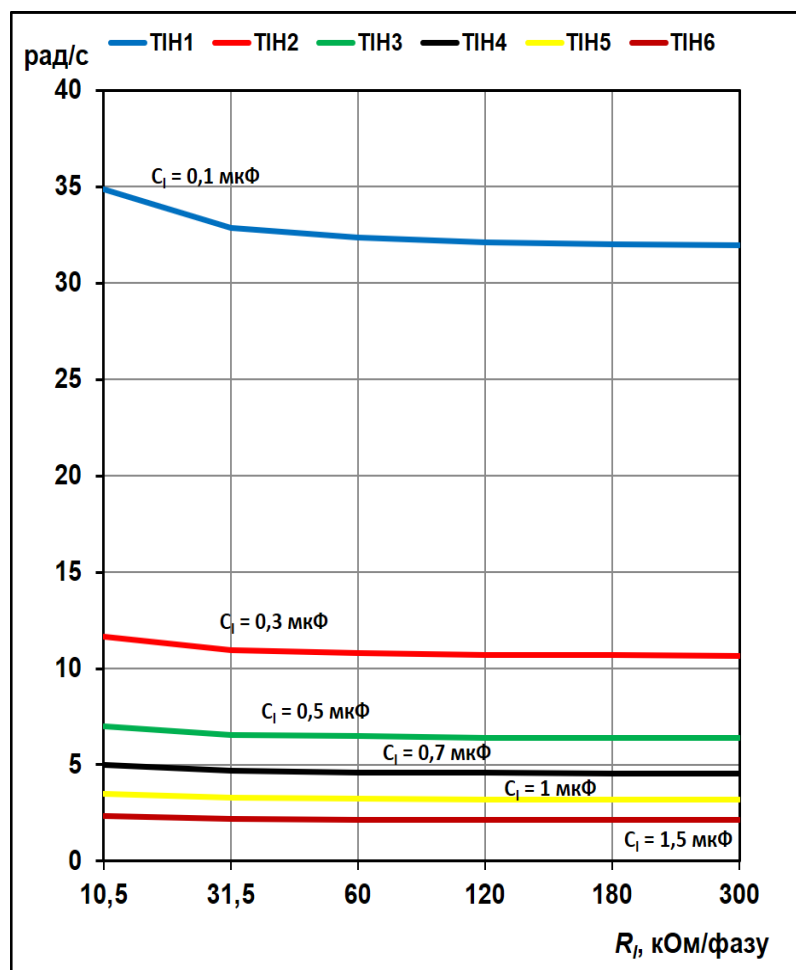


Рисунок 3.16 – Параметрические зависимости электромагнитных постоянных T_{IH} колебаний в контурах изоляции с учетом параметров тела человека

Этот факт объясняется тем, что в случае прикосновения человека к фазе сети сопротивление цепи утечки через его активную составляющую резко снижается до значений, близких к 1 кОм и практически не зависит от значения R_I .

По сути, происходит шунтирование активного сопротивления цепи утечки. При этом величина тока утечки I_y и электромагнитная постоянная T_{IH} зависят только от величины емкости изоляции фазы сети C_I относительно земли.

Расчетные значения эквивалентного сопротивления фазной изоляции и электромагнитной постоянной колебательного контура с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции при различных комбинациях параметров сквозной и поляризационной проводимостей приведены в приложении П1 (табл. П1.13 – П1.18).

В результате выполненных расчетов получены параметрические зависимости $R_{IF} = f(\ln R_A)$ при $C_I = 0,1$ мкФ/фазу и $R_I = var$ (см. рисунок 3.17).

На рисунке 3.18 представлены зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при условии $C_I = 0,1$ мкФ/фазу, и $R_I = var$.

Анализ зависимостей $R_{IF} = f(\ln R_A)$ и $T_{IF} = f(\ln R_A)$ показал, что при изменении R_I в диапазоне 31,5 – 240 кОм/фазу и $C_I = 0,1$ мкФ/фазу происходит резкое снижение R_{IF} при уровне сопротивления абсорбции $R_A = 125 – 250$ кОм и емкости абсорбции, изменяющейся в диапазоне $C_A = 0,01 – 0,1$ мкФ/фазу. При этом электромагнитная постоянная времени T_{IF} резко возрастает, причем для значений $R_I < 120$ кОм/фазу это увеличение более чем двукратное.

Анализ нижнего предела допустимых сопротивлений показал их практическое совпадение для максимумов функций $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при $C_A \leq 0,1$ мкФ/фазу.

Например, при $R_I = 31,5$ кОм/фазу и $C_I = 0,1$ мкФ/фазу эквивалентное сопротивление $R_{IF} = 25,5$ кОм при предельно допустимом $R_{доп} = 24,2$ кОм, что соответствует максимальному значению $T_{IF} = 1,178$ рад/с. При изменении емкости изоляции в диапазоне $C_I = 0,1 – 0,5$ мкФ/фазу и неизменном уровне активного сопротивления $R_I = 60$ кОм/фазу снижение эквивалентного сопротивления ниже допустимого предела возможно лишь при $R_A < 250$ кОм/фазу и $C_A > 0,1$ мкФ/фазу.

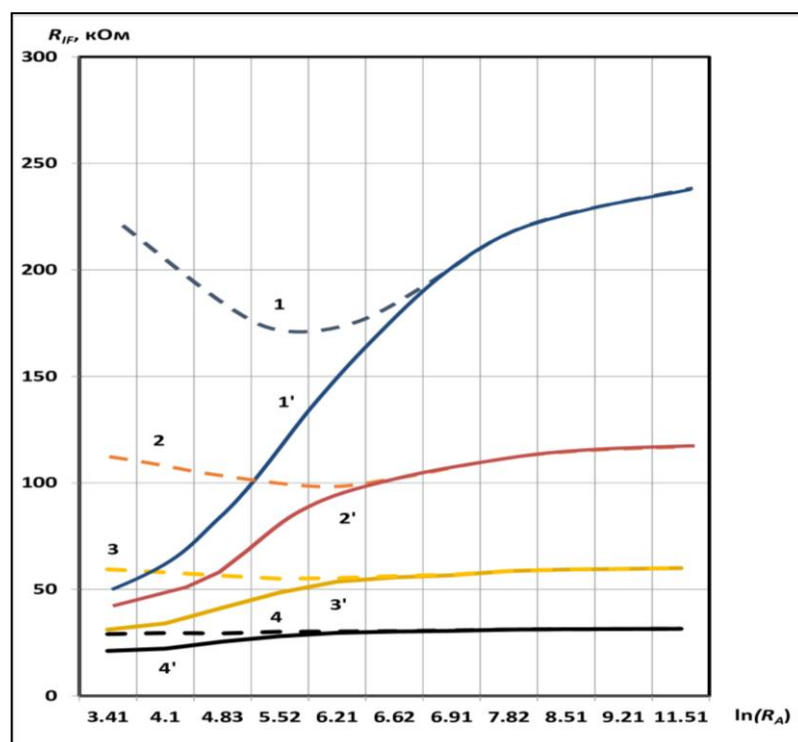


Рисунок 3.17 – Зависимости $R_{IF} = f(\ln(R_A))$ при $C_I = 0,1$ мкФ/фазу, и $R_I = var$: 1 – 60 кОм, 2 – 120 кОм, 3 – 240 кОм (при $C_A = 0,1$ мкФ); 1' – 60 кОм, 2' – 120 кОм, 3' – 240 кОм (при $C_A = 0,01$ мкФ)

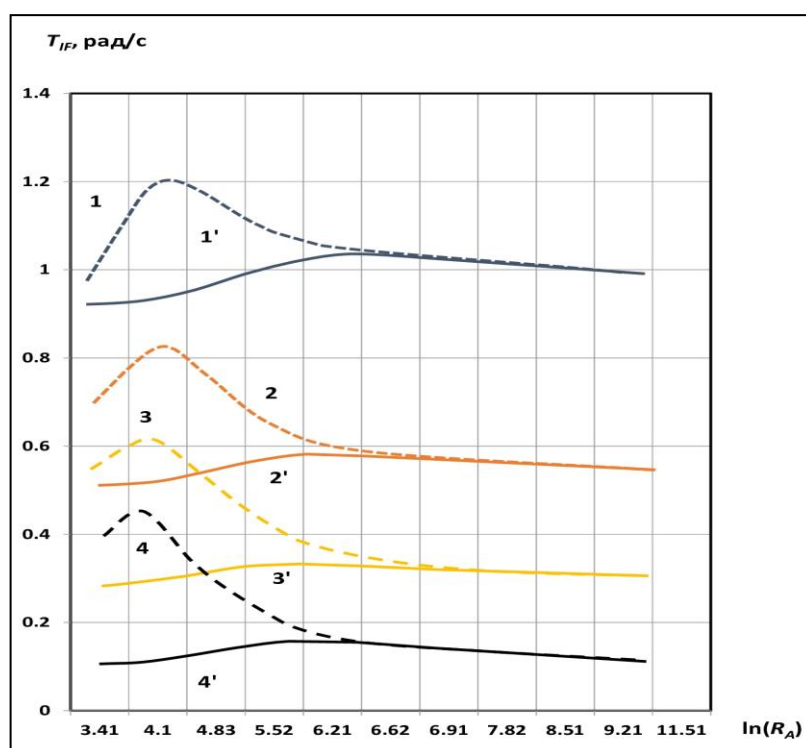


Рисунок 3.18 – Зависимости $T_{IF} = f(\ln(R_A))$ при $C_I = const$, и $R_I = var$: 1 – 31,5 кОм, 2 – 60 кОм, 3 – 120 кОм, 4 – 240 кОм (при $C_A = 0,1$ мкФ); 1' – 31,5 кОм, 2' – 60 кОм, 3' – 120 кОм, 4' – 240 кОм (при $C_A = 0,01$ мкФ)

При этом совпадения максимумов T_{IF} с соответствующими им значениями $R_{\text{доп}}$ не наблюдается. Фактически емкость объемных зарядов становится соизмерима емкости поясной изоляции. Электромагнитные колебания в контуре, образованном активными и емкостными сопротивлениями, достигают максимальной частоты и амплитуды.

На рисунке 3.19 представлены зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при условии постоянства параметров $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,1$ мкФ/фазу и изменении абсорбционного сопротивления $R_{IA} = 31,5 - 10^5$ кОм/фазу и емкости $C_{IA} = 0,01 - 0,45$ мкФ/фазу.

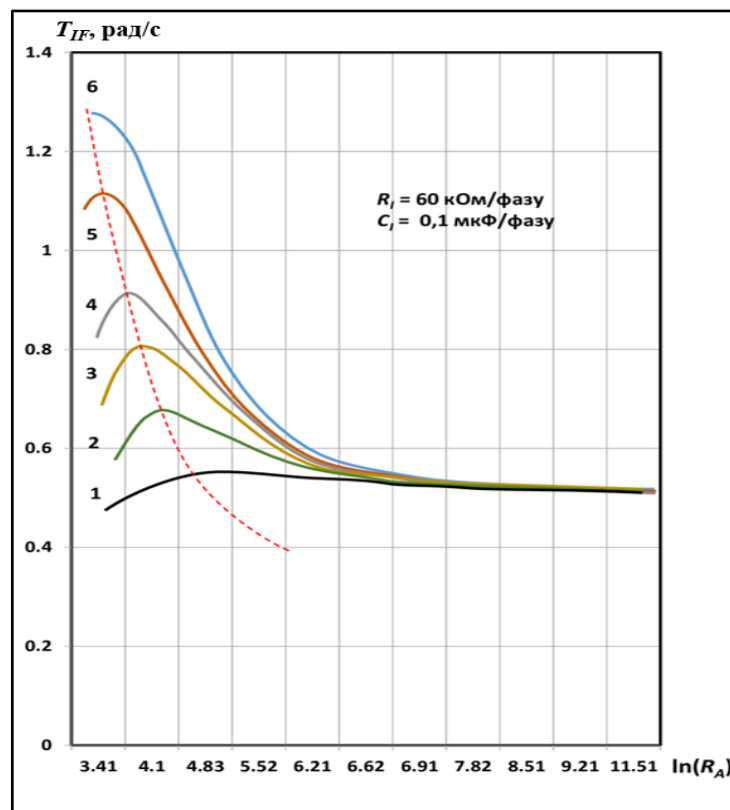


Рисунок 3.19 – Зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,1$ мкФ/фазу при $C_A = \text{var}$: 1 – 0,01 мкФ, 2 – 0,05 мкФ, 3 – 0,1 мкФ, 4 – 0,15 мкФ, 5 – 0,3 мкФ, 6 – 0,45 мкФ

На рисунке 3.20 представлены зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при условии постоянства параметров $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу и изменении абсорбционного сопротивления $R_{IA} = 31,5 - 10^5$ кОм/фазу и емкости $C_{IA} = 0,01 - 0,45$ мкФ/фазу.

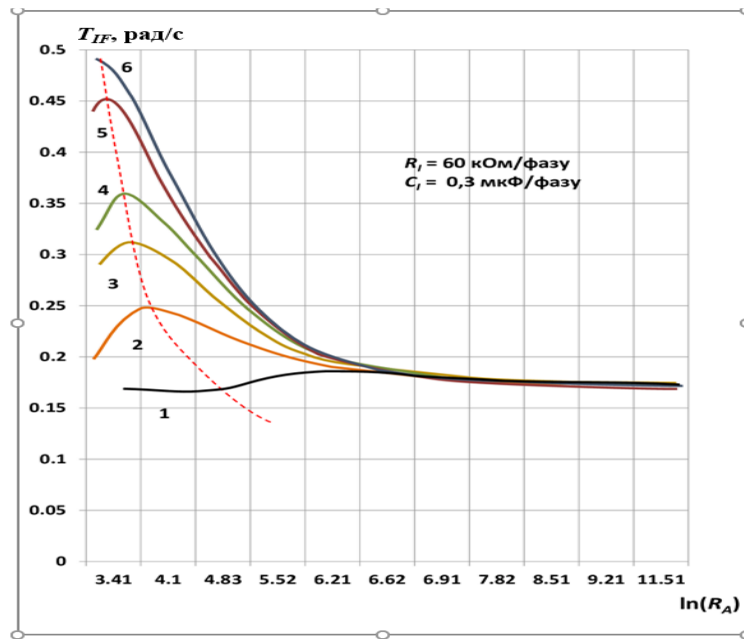


Рисунок 3.20 – Зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу при $C_A = \text{var}$: 1 – $0,01$ мкФ, 2 – $0,05$ мкФ, 3 – $0,1$ мкФ, 4 – $0,15$ мкФ, 5 – $0,3$ мкФ, 6 – $0,45$ мкФ

На рисунке 3.21 представлены зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при условии постоянства параметров $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу и изменении абсорбционного сопротивления $R_{IA} = 31,5 - 10^5$ кОм/фазу и емкости $C_{IA} = 0,01 - 0,45$ мкФ/фазу.

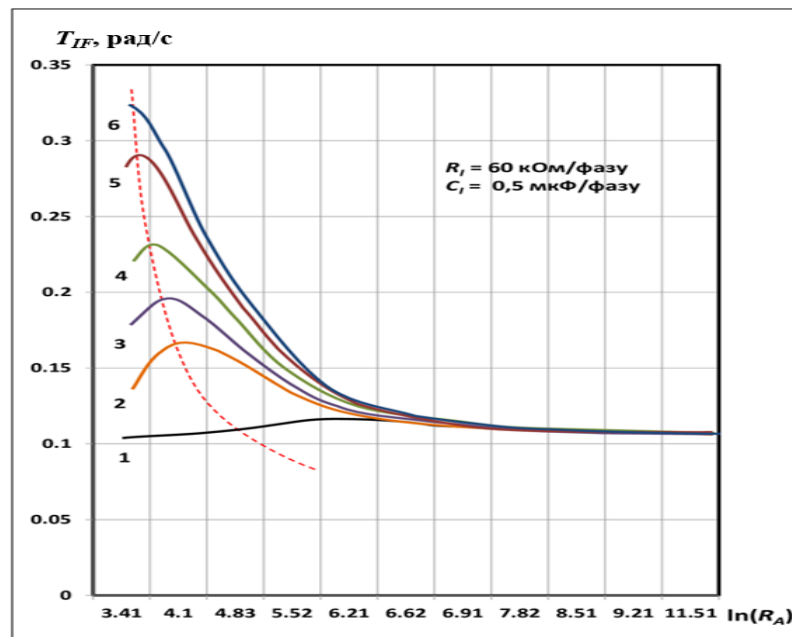


Рисунок 3.21 – Зависимости $T_{IF} = f(\ln R_A)$ при $R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,5$ мкФ/фазу при $C_A = \text{var}$: 1 – $0,01$ мкФ, 2 – $0,05$ мкФ, 3 – $0,1$ мкФ, 4 – $0,15$ мкФ, 5 – $0,3$ мкФ, 6 – $0,45$ мкФ

Анализ показал, что с ростом емкости C_{IA} электромагнитная постоянная T_{IF} увеличивается, причем функция имеет явно выраженный экстремум, который приходится на значения R_{IA} диапазоне от 31,3 кОм до 125 кОм. При значениях емкости абсорбции соизмеримой с геометрической емкостью изоляции электромагнитная постоянная достигает максимального значения, т.е. поляризация имеет максимальную амплитуду и продолжительность.

В результате моделирования режимов утечки с учетом низкочастотной поляризации в изоляции сети с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО выполнен анализ характера изменения тока утечки и его составляющих при различных комбинациях сопротивлений изоляции сквозному току и току абсорбции.

Для симметричного режима утечки принимались параметры $C_{a6} = 0,03 - 0,15$ мкФ/фазу, $R_{a6} = 10 - 180$ кОм/фазу, $R_I = 180$ кОм/фазу и $C_I = 0,1 - 0,15$ мкФ/фазу.

При анализе было принято условие, что значение активного сопротивления и емкости абсорбции при низкочастотной поляризации не должно превышать фазных значений сопротивления и емкости изоляции при сквозном токе утечки.

На рисунке 3.22 приведена осциллограмма токов утечки при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{a6} = 90$ кОм/фазу, $C_{a6} = 0,06$ мкФ/фазу. Токи утечки: полный ток фазы (красный) $I_y = 25,4$ мА; емкостной ток (желтый) $I_{yC} = 21,2$ мА; активная составляющая полного тока $I_{yR} = 3,4$ мА; ток абсорбции $I_{a6} = 6,3$ мА.

На рисунке 3.23 приведена осциллограмма токов утечки при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{a6} = 160$ кОм/фазу, $C_{a6} = 0,06$ мкФ/фазу. Токи утечки: $I_y = 22,9$ мА; $I_{yC} = 21,2$ мА; $I_{yR} = 3,4$ мА; $I_{a6} = 3,4$ мА.

На рисунке 3.24 приведена осциллограмма токов утечки при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{a6} = 10$ кОм/фазу, $C_{a6} = 0,1$ мкФ/фазу. Токи утечки: $I_y = 52$ мА; $I_{yC} = 31$ мА; $I_{yR} = 4$ мА; $I_{a6} = 20$ мА.

На рисунке 3.25 приведена осциллограмма токов утечки при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{a6} = 160$ кОм/фазу, $C_{a6} = 0,1$ мкФ/фазу. Токи утечки: $I_y = 32$ мА; $I_{yC} = 31$ мА; $I_{yR} = 4$ мА; $I_{a6} = 3,5$ мА.

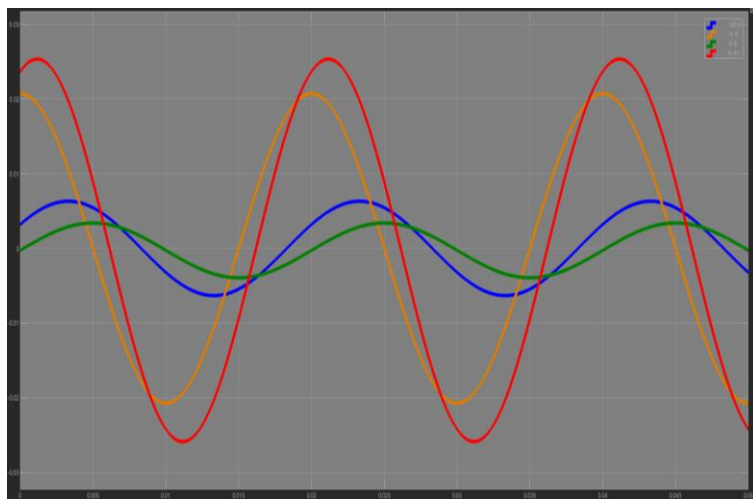


Рисунок 3.22 – Осциллограмма токов утечки при $R_l = 180$ кОм/фазу,
 $C_l = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{аб} = 90$ кОм, $C_{аб} = 0,06$ мкФ

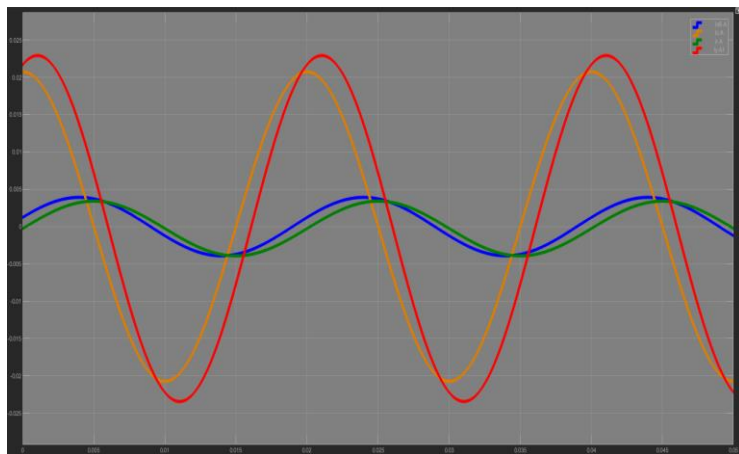


Рисунок 3.23 – Осциллограмма токов утечки при $R_l = 180$ кОм/фазу,
 $C_l = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{аб} = 160$ кОм, $C_{аб} = 0,06$ мкФ

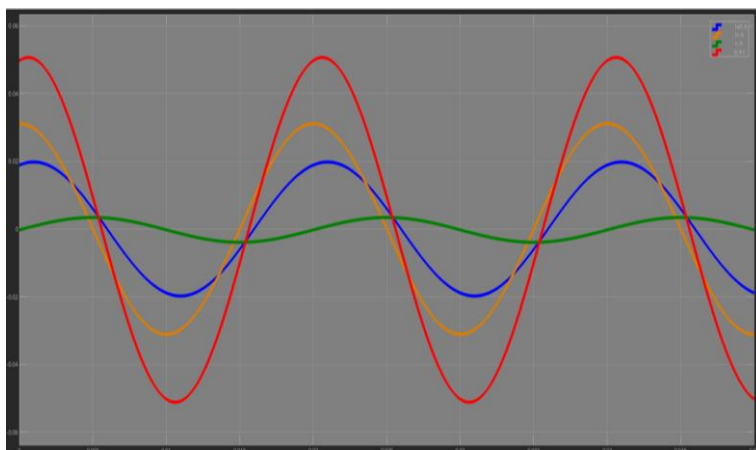


Рисунок 3.24 – Осциллограмма токов утечки при $R_l = 180$ кОм/фазу,
 $C_l = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{аб} = 10$ кОм, $C_{аб} = 0,1$ мкФ

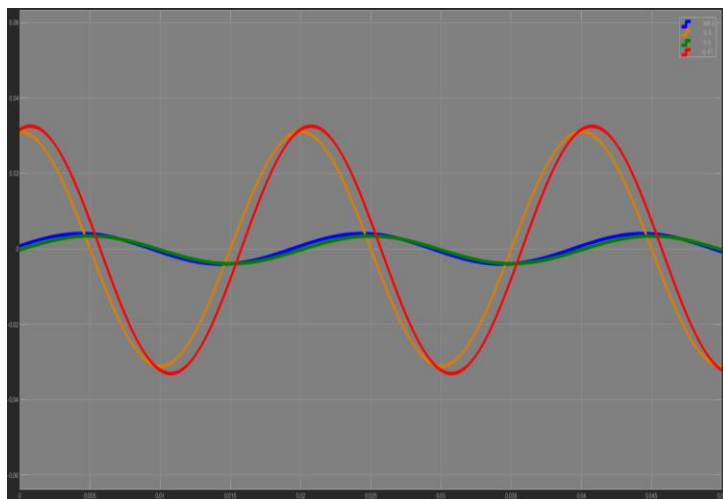


Рисунок 3.25 – Осциллограмма токов утечки при $R_I = 180$ кОм/фазу,
 $C_I = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{аб} = 160$ кОм, $C_{аб} = 0,1$ мкФ

Предварительный анализ показал, что при условии изменения $R_{аб}$ от 10 до 180 кОм/фазу и неизменных остальных параметрах изоляции, активная и емкостная составляющие полного тока утечки остаются практически неизменными как по амплитуде, так и по фазовому сдвигу относительно I_y .

Анализ влияния низкочастотных поляризаций на сопротивление фазной изоляции сети позволил сделать следующие выводы.

1. На величину тока утечки оказывают влияние поляризационные процессы в изоляции, при которых уровень активного сопротивления абсорбции не превышает 500 кОм/фазу и емкость абсорбции более 0,1 мкФ/фазу.
2. Составляющая тока абсорбции достигает до 30 – 40% от величины полного тока утечки через фазную изоляцию.
3. Чем выше уровень сопротивления изоляции сквозному току утечки, тем при более высоких уровнях сопротивления абсорбции возникают условия, при которых процессы поляризации приводят к снижению эквивалентного сопротивления до уровня $R_{IF} < R_{доп}$.
4. Реальное сопротивление изоляции сети относительно земли с учетом токов абсорбции может быть существенно ниже, допустимого уровня. При этом создаются условия для возникновения резонанса тока утечки при определенных

соотношениях активного сопротивления R_{IF} и емкости C_{IF} изоляции сети в случае введения индуктивности в нейтраль силового трансформатора.

3.5. Метод оценки безопасности режимов утечки тока

При оценке опасности поражения электрическим током в рудничных электрических сетях исследовались различные случаи и ситуации прикосновения человека к фазе электрической сети. Опасность однополюсного прикосновения, приводящего к возникновению однофазной утечки тока, изучена достаточно подробно [8, 40, 216]. При этом следует отметить, что при анализе опасности электропоражения необходимо учитывать режим, предшествующий прикосновению, степень несимметрии сопротивлений изоляции сети относительно земли, а также при какой комбинации фазных сопротивлений и какой конкретно фазе произошло включение человека в электрическую сеть.

С точки зрения электробезопасности важно определить, каким образом распределяются фазные величины напряжений в случае, если утечка тока обусловлена однополюсным подключением человека к фазе электрической сети.

На рисунке 3.26 приведена осциллограмма фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали при однополюсном прикосновении человека ($R_H = 1 \text{ кОм}$) к фазе А при следующей комбинации параметров изоляции: $R_a = R_b = R_c = 120 \text{ кОм}$, $C_a = C_b = C_c = 0,3 \text{ мкФ}$.

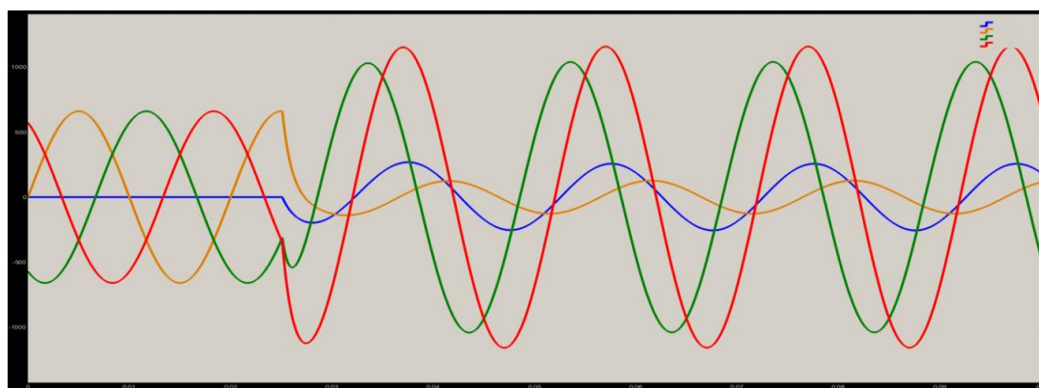


Рисунок 3.26 – Осциллограмма фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали при однополюсном прикосновении человека к фазе А

На рисунке 3.27 приведена аналогичная осциллограмма фазных токов и тока нейтрали при однополюсном прикосновении человека ($R_H = 1 \text{ кОм}$) к фазе А.

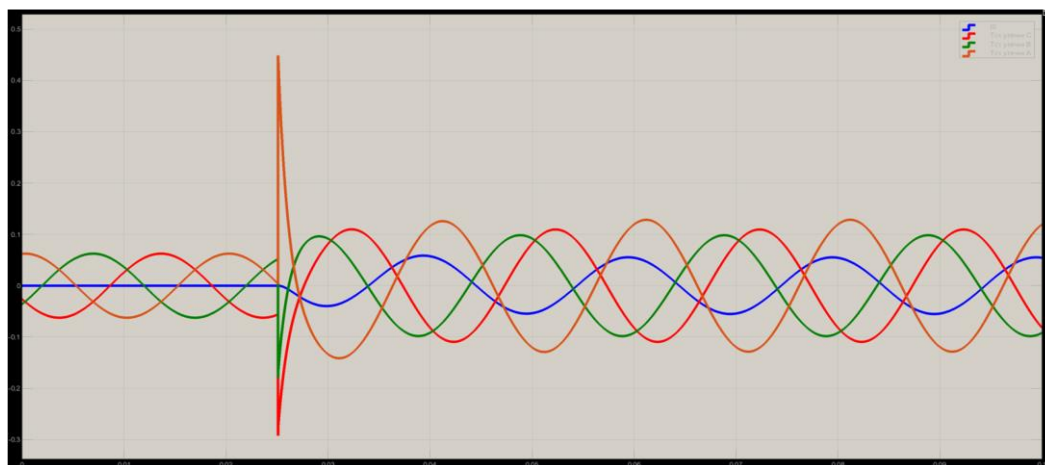


Рисунок 3.27 – Осциллограмма фазных токов и тока нейтрали при однополюсном прикосновении человека ($R_H = 1 \text{ кОм}$) к фазе А

На рисунке 3.28 приведена векторная диаграмма напряжений при возникновении утечки тока через тело человека в случае прикосновения к фазе А при условии равенства активных и реактивных составляющих сопротивления изоляции сети $R_A = R_B = R_C = 120 \text{ кОм}$; $C_A = C_B = C_C = 0,5 \text{ мкФ}$.

При возникновении утечки происходит определенное шунтирование сопротивления фазы А, т.к. сопротивление $R_h = 1 \text{ кОм}$ существенно меньше активного и емкостного сопротивления изоляции. Напряжение и угол сдвига фазы А составляют $\dot{U}_{FA} = 258,5 \text{ В}$ ($\varphi_A = 26,4^\circ$). Напряжение и углы сдвига фаз В и С – соответственно $\dot{U}_{FB} = 870,3 \text{ В}$ ($\varphi_B = 261,4^\circ$) и $\dot{U}_{FC} = 1105 \text{ В}$ ($\varphi_C = 327,3^\circ$). Напряжение смещения нейтрали и угол сдвига составляют соответственно $\dot{U}_0 = 554,4 \text{ В}$ и $\varphi_0 = 307,3^\circ$. Ток $I_h = 277,7 \text{ мА}$.

При изменении параметров активного сопротивления изоляции в диапазоне $R_I = 10,5 - 300 \text{ кОм/фазу}$ и емкости сети $C_I = 0,1 - 1,5 \text{ мкФ}$ ток I_h изменяется в диапазоне $61,1 - 553,4 \text{ мА}$. При этом напряжения фаз изменяются в диапазонах $\dot{U}_{FA} = 54,0 - 514,8 \text{ В}$, $\dot{U}_{FB} = 561 - 1026 \text{ В}$, $\dot{U}_{FC} = 916,1 - 1105 \text{ В}$, т.е. напряжение в неповрежденных фазах В и С приближается к линейным величинам. Углы сдвига фаз изменяются в диапазоне: $\varphi_A = 9,2^\circ - 77,9^\circ$ (первый квадрант векторной

На рисунке 3.29 приведена совмещенная векторная диаграмма изменения тока I_h и напряжения U_0 при неизменном активном сопротивлении изоляции сети $R_I = 300$ кОм и переменной емкости $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ.

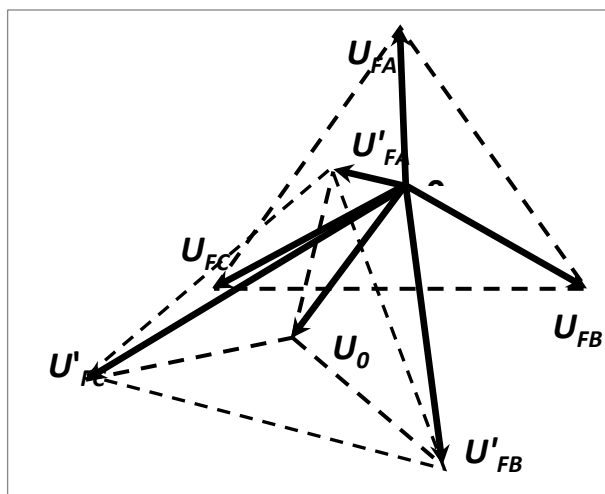


Рисунок 3.28 – Векторная диаграмма напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}, \dot{U}_0$ при утечке тока через человека (прикосновение к фазе A)

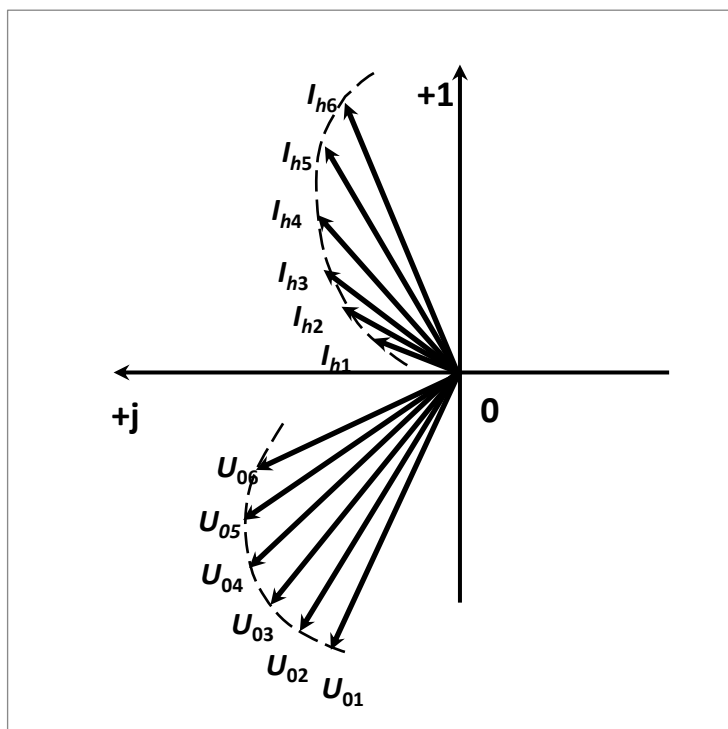


Рисунок 3.29 – Векторная диаграмма изменения тока I_h и напряжения смещения нейтрали \dot{U}_0 ($R_I = 300 \text{ кОм}$, $C_I = 0,1 - 1,5 \text{ мкФ}$)

Анализ диаграммы показал, что емкость изоляции сети оказывает существенное влияние как на величину тока I_h , который с ростом емкости увеличивается от 60,6 мА до 553,4 мА, так и на величину напряжения U_0 , которое уменьшается от 611,2 В до 355,9 В. При этом угол сдвига фазы между напряжением \dot{U}_0 и током \dot{I}_h остается неизменным и составляет 90° . Это объясняется тем, что при активном сопротивлении R_h ток \dot{I}_h и напряжение \dot{U}_{FA} совпадают по фазе. При этом, как и в ранее описанном случае однофазной утечки при снижении активного сопротивления поврежденной фазы сети, вектор напряжения \dot{U}_0 опережает фазное напряжение на 90° в силу емкостного характера изоляции сети. Таким образом, между током \dot{I}_h и напряжением \dot{U}_0 существует обратная связь. С увеличением емкости фаз сети относительно земли, степень несимметрии изоляции уменьшается и, следовательно, \dot{U}_0 также уменьшается. При этом с ростом емкости общее сопротивление изоляции сети снижается и ток через человека возрастает.

Исходя из требований [156] независимо от уровня активного сопротивления изоляции при емкости $C_I > 0,3$ мкФ сеть с фазным напряжением 660 В является опасной для человека.

Анализ характера изменения тока \dot{I}_h позволяет сделать вывод о том, что при емкости более 0,5 мкФ/фазу существует реальная опасность поражения человека электрическим током, т.к. его значение превышает допустимый ток $I_{доп} = 250$ мА в кратковременном режиме воздействия ($t_h \leq 0,2$ с) [156].

На рисунке 3.30 приведены графики зависимостей тока I_h при изменении активного сопротивления и неизменных емкостях изоляции фаз сети.

Анализ зависимостей $I_h = f(R_I, C_I)$ показывает, что наибольшее изменение тока происходит при изменении R_I от 10,5 кОм/фазу до 60 кОм/фазу. При $C_I = 0,1$ мкФ ток через человека I_h уменьшается от 153,5 мА до 65,7 мА (57,5%), в то время как при $C_I = 1,5$ мкФ ток I_h увеличивается с 503,1 мА до 543,8 мА. (7,5%).

В интервале сопротивлений R_I от 60 до 120 кОм/фазу ток через человека изменяется в меньшей степени, а при сопротивлениях более 120 кОм/фазу

практически не зависит от величины активного сопротивления и может считаться только емкостным.

Из анализа зависимостей (рисунок 3.30) следует, что при емкости изоляции сети $C_I \geq 0,45$ мкФ/фазу величина тока I_h практически не зависит от величины активного сопротивления изоляции, т.е. ее защитные функции в случае прикосновения к фазе сети не обеспечены и опасность поражения возрастает.

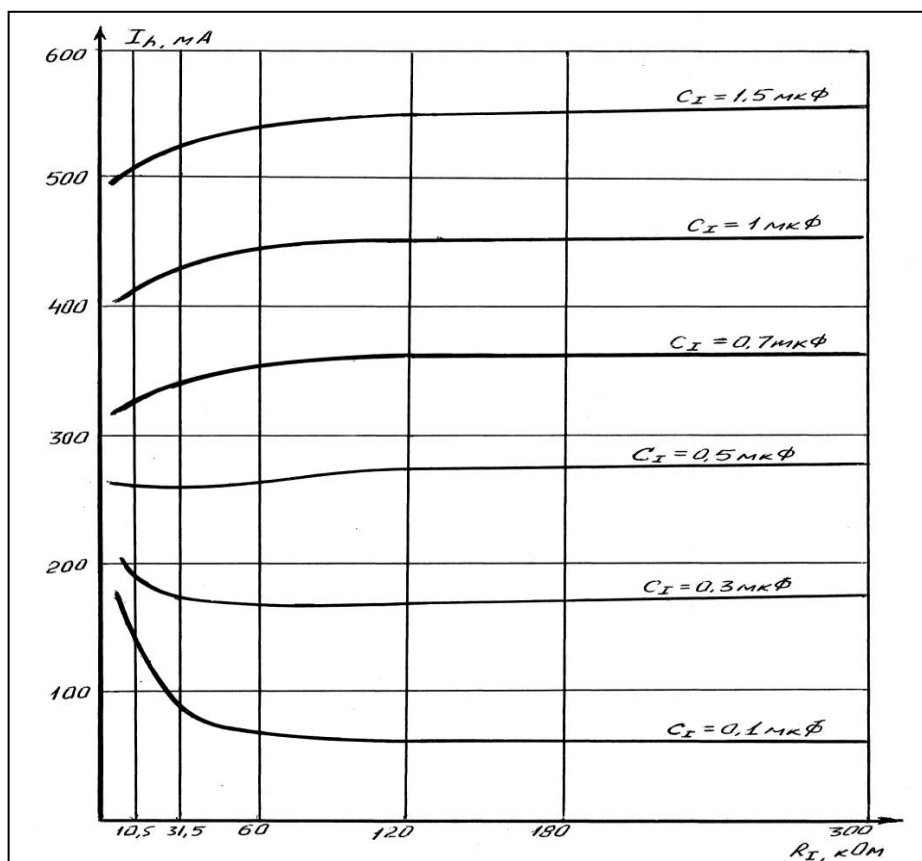


Рисунок 3.30 – Графики зависимостей $I_h = f(R_I, C_I)$ при $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу и $C_I = const$

Безопасными с точки зрения защитных свойств изоляции можно считать только короткие сети с емкостью изоляции не более 0,3 мкФ/фазу и уровнем активного сопротивления изоляции не ниже 31,5 кОм/фазу.

Выполненный анализ показал, что влияние изменения сопротивления фазной изоляции на опасность поражения относится к случаю, когда до момента прикосновения активные и емкостные сопротивления фаз сети соответственно равны между собой (режим симметричной утечки тока).

В работе был выполнен анализ влияния токов утечки на опасность электропоражения при условии, когда до момента прикосновения уже существует различной степени несимметрия активных сопротивлений изоляции.

На рисунках 3.31 и 3.32 приведены осциллограммы соответственно напряжений и токов в цепи утечки при прикосновении человека к фазе А при $R_a = R_b = 300$ кОм, $R_c = 10,5$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ.

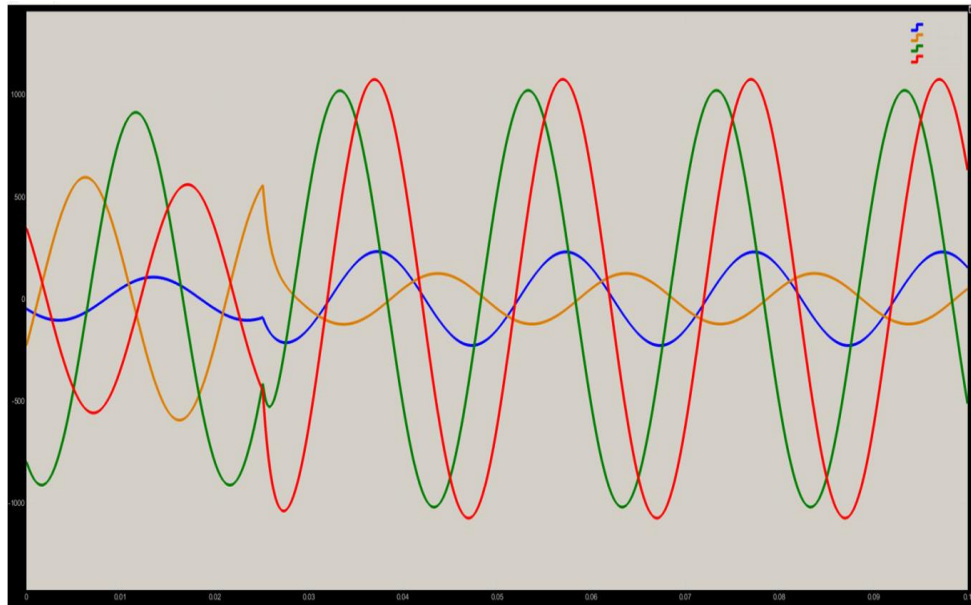


Рисунок 3.31 – Осциллограмма напряжений при прикосновении человека к фазе А при $R_a = R_b = 300$ кОм, $R_c = 10,5$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ

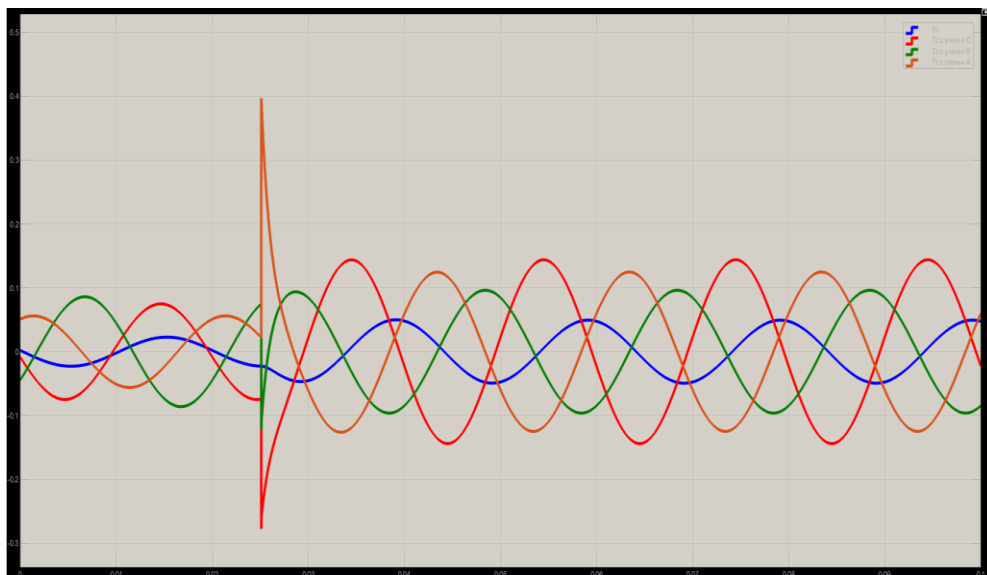


Рисунок 3.32 – Осциллограмма токов утечки при прикосновении человека к фазе А при $R_a = R_b = 300$ кОм, $R_c = 10,5$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ

На рисунках 3.33 и 3.34 приведены осциллограммы соответственно напряжений и токов в цепи утечки при прикосновении человека к фазе А при $R_a = R_c = 300$ кОм, $R_b = 10,5$ кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ.

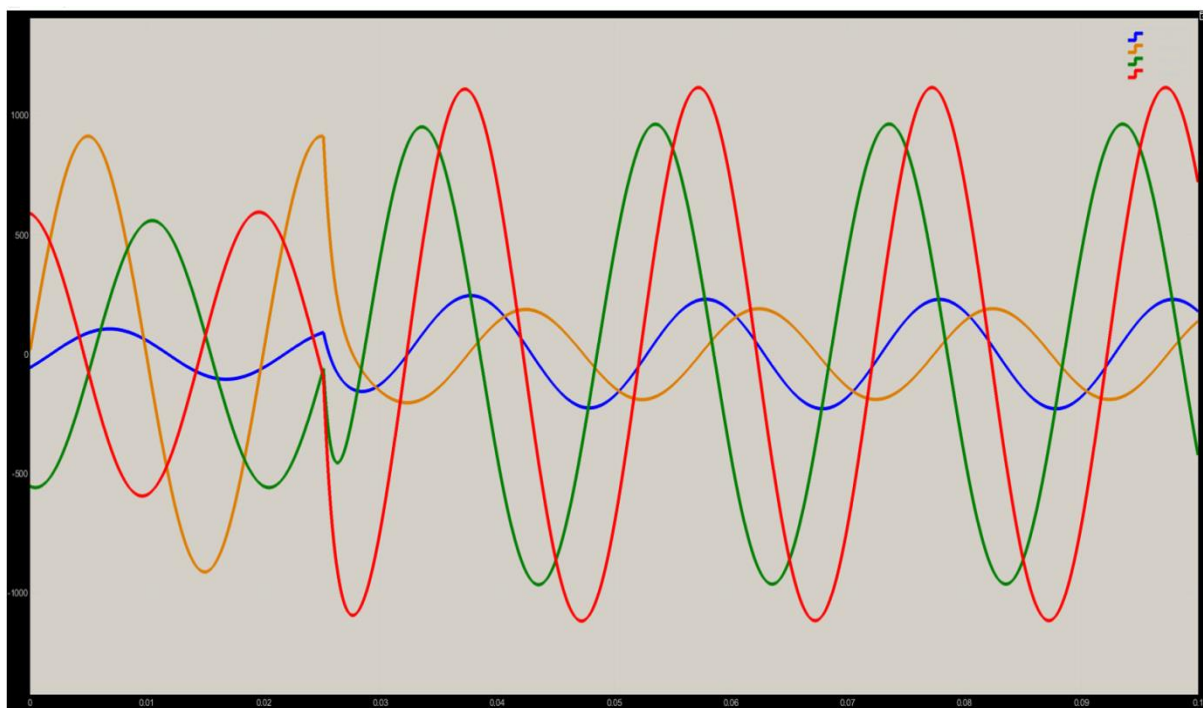


Рисунок 3.33 – Осциллограмма при $R_a = R_c = 300$ кОм, $R_b = 10,5$ кОм,
 $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ

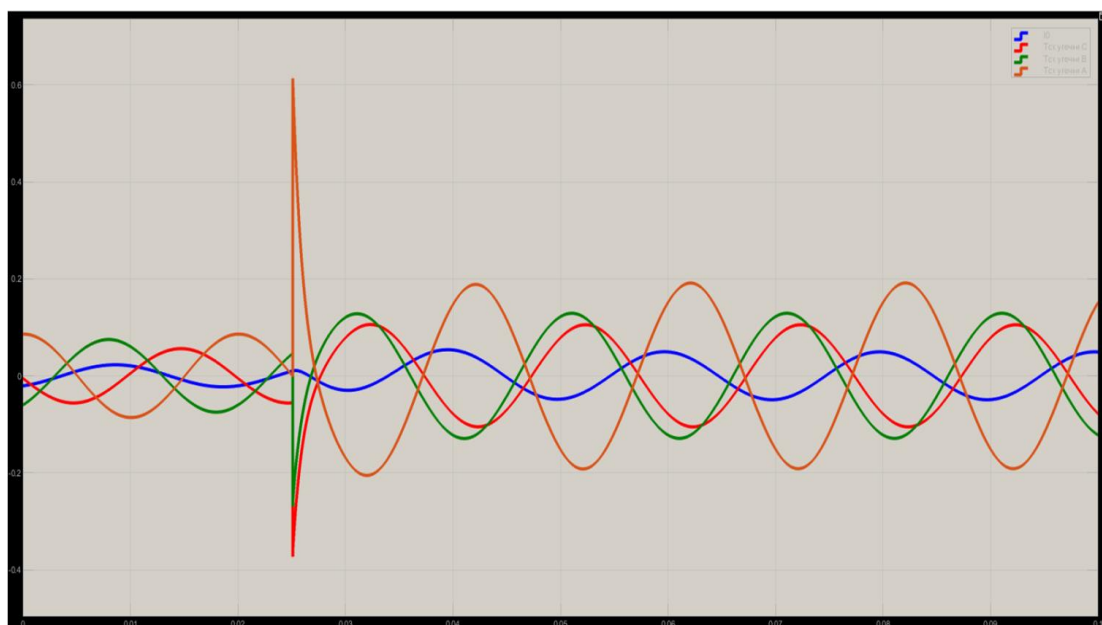


Рисунок 3.34 – Осциллограмма токов утечки при $R_a = R_c = 300$ кОм, $R_b = 10,5$
кОм, $C_a = C_b = C_c = 0,3$ мкФ

На рисунке 3.35 представлены совмещенные векторные диаграммы напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}$ и \dot{U}_0 в случае прикосновения человека к фазе электрической сети и при условии существования в ней несимметрии изоляции сети относительно земли для двух возможных случаев.

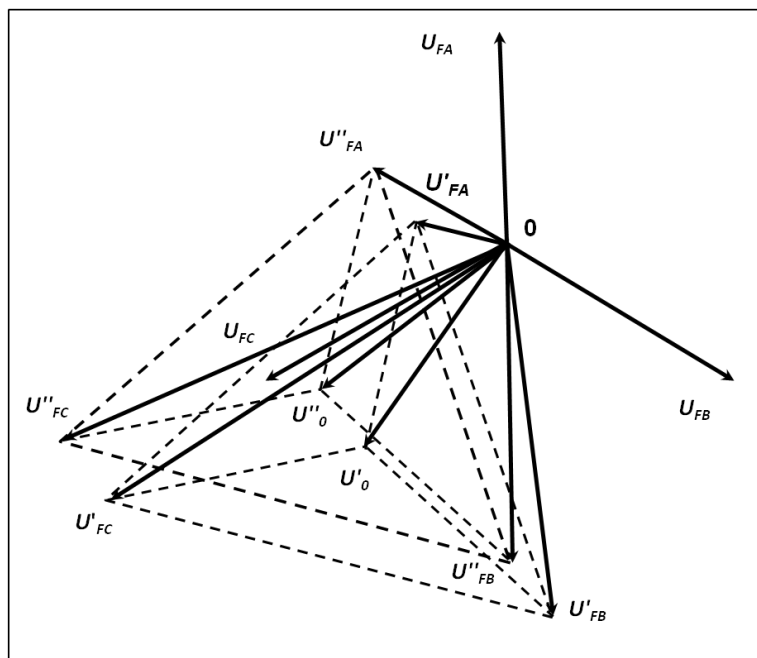


Рисунок 3.35 – Совмещенные векторные диаграммы напряжений $\dot{U}'_{FA}, \dot{U}'_{FB}, \dot{U}'_{FC}, \dot{U}'_0$ и $\dot{U}''_{FA}, \dot{U}''_{FB}, \dot{U}''_{FC}, \dot{U}''_0$ при прикосновении человека к фазе А

В первом случае ($\dot{U}'_{FA}, \dot{U}'_{FB}, \dot{U}'_{FC}, \dot{U}'_0$) человек прикоснулся к фазе А, имеющей сопротивление $R_A = 300$ кОм. Сопротивление фазы В также составляет $R_B = 300$ кОм, сопротивление фазы С составляет $R_C = 10,5$ кОм, а емкость изоляции сети $C_I = 0,5$ мкФ/фазу. Следует отметить, что общее сопротивление в цепи утечки тока через человека практически не зависит от уровня сопротивления фазы, в которой произошло прикосновение, поэтому начальное сопротивление (в нашем случае R_A) может быть любым в заданном диапазоне $10,5 - 300$ кОм.

Во втором случае ($\dot{U}''_{FA}, \dot{U}''_{FB}, \dot{U}''_{FC}, \dot{U}''_0$) сопротивление фазы В составляет $R_B = 10,5$ кОм, сопротивление фазы С составляет $R_C = 300$ кОм, а емкость изоляции сети остается неизменной $C_I = 0,5$ мкФ.

На величины фазных напряжений оказывает влияние не только уровень сопротивления изоляции отдельных фаз и степень их несимметрии, но и взаимное

соотношение в предшествующем касанию режиме, а также к какой конкретно из фаз прикоснулся человек.

Это наглядно продемонстрировано на графиках рисунка 3.36. В случае, когда прикосновение человека произошло в фазе A , сопротивление фазы B высокое (300 кОм), а сопротивление фазы C низкое (10,5 кОм) ток I_{h1} по мере увеличения емкости изоляции от 0,1 до 1,5 мкФ возрастает от 88 мА до 503 мА. При этом в случае, когда прикосновение произошло к фазе A , сопротивление фазы B низкое (10,5 кОм), а сопротивление фазы C высокое (300 кОм) ток через человека I_{h2} соответственно увеличивается от 135 мА до 565 мА. Таким образом, величина тока I_{h2} превышает I_{h1} на 47 – 62 мА.

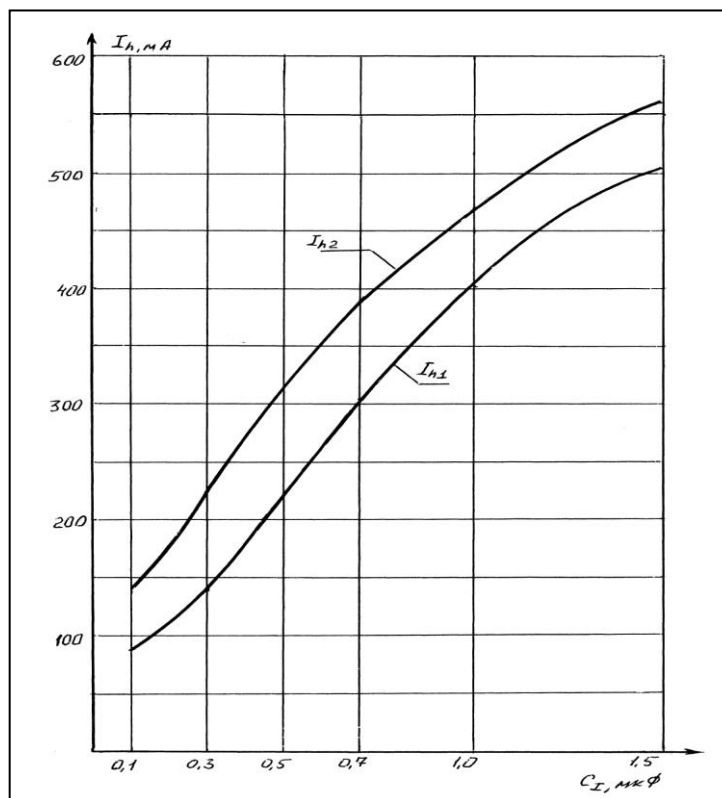


Рисунок 3.36 – Графики функции $I_{h1} = f(C_I)$ при $R_B = 300 \text{ кОм}$, $R_C = 10,5 \text{ кОм}$
и $I_{h2} = f(C_I)$ при $R_B = 10,5 \text{ кОм}$, $R_C = 300 \text{ кОм}$

Векторная диаграмма изменения тока \dot{I}_h и напряжения \dot{U}_0 , при изменении емкости изоляции сети $C_I = 0,1 - 1,0 \text{ мкФ}$ для случая $R_y = R_A // R_h = 300 // 1 \text{ кОм}$, $R_B = 300 \text{ кОм}$, $R_C = 10,5 \text{ кОм}$ представлена на рисунке 3.37. Соответственно, векторная диаграмма изменения тока через человека и напряжения смещения

нейтрали, при изменении емкости от 0,1 до 1,0 мкФ для случая $R_y = R_A // R_h = 300 // 1$ кОм, $R_B = 10,5$ кОм, $R_C = 300$ кОм представлена на рисунке 3.38.

В случае несимметрии параметров изоляции фаз сети и прикосновении человека к одной из них ток утечки возрастает по мере увеличения емкостной составляющей сопротивления изоляции.

При этом за счет снижения степени несимметрии фазных напряжений величина \dot{U}_0 снижается. Отличительной особенностью является тот факт, что угол между током \dot{I}_h и напряжением \dot{U}_0 не остается неизменным, как в случае, представленном на диаграмме рисунка 3.29, а уменьшается от 173° до 84° в первом (рисунок 3.37) и от 108° до 60° во втором варианте (рисунок 3.38).

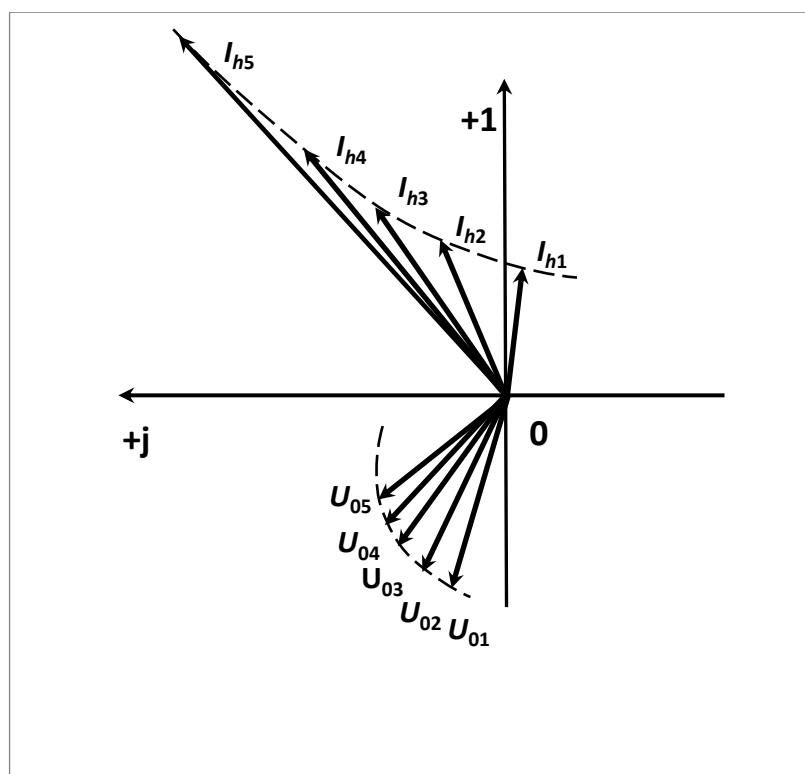


Рисунок 3.37 – Векторная диаграмма тока \dot{I}_h и напряжения \dot{U}_0 при $C_I = 0,1 - 1,0$ мкФ/фазу, $R_B = 300$ кОм, $R_C = 10,5$ кОм

Полученные в результате моделирования данные о величинах тока I_h через человека при различных параметрах активного сопротивления и емкости изоляции сети, приведенные в Приложении П1 (таблицы П1.3 – П1.4).

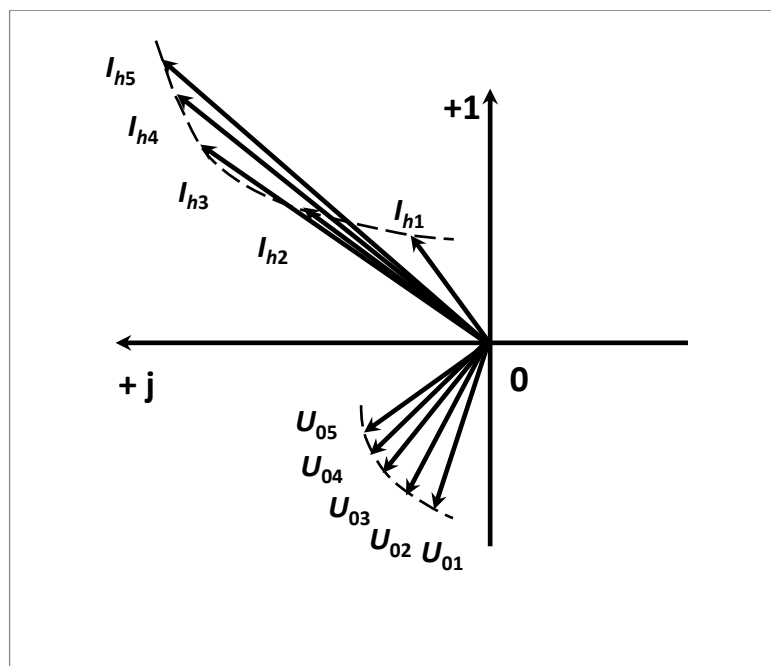


Рисунок 3.38 – Векторная диаграмма тока \dot{I}_h и напряжения \dot{U}_0 при $C_I = 0,1 - 1,0$ мкФ, $R_B = 10,5$ кОм, $R_C = 300$ кОм

В качестве критерия оценки степени несимметрии фазных напряжений, обусловленной изменением активных сопротивлений изоляции, используем коэффициент несимметрии k_{NU} .

Результаты расчета k_{NU} при различных сочетаниях параметров изоляции фаз сети относительно земли приведены в приложении П1 (таблицы П1.5 – П1.6). При этом следует отметить, что в случае прикосновения человека к фазе А электрической сети напряжение этой фазы всегда минимально, по отношению к другим фазам, поэтому $U_{FA} = U_{F.min}$.

В соответствии с [156] предельно допустимый ток I_h в кратковременном режиме воздействия t_h (до 1 с) определяется по формуле:

$$I_{h.доп.} = 50/t_{п.}$$

С учетом того, что время воздействия электрического тока на человека ограничено временем срабатывания устройства защитного отключения

$t_h \leq t_{откл.} = 0,2$ с, предельно допустимым для него является ток $I_{h.доп.} = 250$ мА.

Для анализа влияния несимметрии фазных сопротивлений на условия электробезопасности можно условно разделить уровни токов I_h на три интервала:

- при $I_{h,t=0,2} \leq 100$ мА □ считать сеть потенциально безопасной;
- при $I_{h,t=0,2} = 100 - 250$ мА □ считать сеть потенциально опасной;
- при $I_{h,t=0,2} \geq 250$ мА □ считать сеть опасной.

На основании данных, приведенных в таблицах П1.3. – П1.5, потенциально безопасными можно считать электрические сети, активное сопротивление изоляции которых не ниже 31,5 кОм/фазу и емкость не более 0,1 мкФ. В этом случае коэффициент несимметрии фазных напряжений $k_{NU} > 0,89$.

Потенциально опасными следует считать электрические сети, для которых активное сопротивление менее 31,5 кОм/фазу при емкости изоляции более 0,1 мкФ/фазу, а также при любых значениях активного сопротивления изоляции при изменении емкости от 0,1 до 0,5 мкФ/фазу. В этом случае коэффициент несимметрии фазных напряжений находится в диапазоне $k_{NU} = 0,79 - 0,88$.

Опасными следует считать электрические сети, для которых практически при любом значении активного сопротивления изоляции емкость электрической сети превышает 0,5 мкФ/фазу. В этом случае коэффициент несимметрии фазных напряжений находится в диапазоне $k_{NU} = 0,512 - 0,79$.

Метод оценки степени опасности режимов утечки в подземных электрических сетях, может быть представлен соответствующими параметрами позиционирования, приведенными в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры позиционирования безопасности электрической сети

Состояние сети	Ток через человека	Активное сопротивление фазной изоляции	Емкость фазной изоляции	Коэффициент несимметрии фазных напряжений
сеть потенциально безопасная	$I_{h,t=0,2} \leq 100$ мА	$R_{FI} \geq 31,5$ кОм/фазу	$C_{FI} \leq 0,1$ мкФ	$k_{NU} > 0,89$
сеть потенциально опасная	$I_{h,t=0,2} = 100 - 250$ мА	$R_{FI} \leq 31,5$ кОм/фазу	$C_{FI} \geq 0,1$ мкФ	$k_{NU} = 0,79 - 0,88$
		$R_{FI} = 31,5 - 300$ кОм/фазу	$C_{FI} = 0,1 - 0,5$ мкФ	
сеть опасная	$I_{h,t=0,2} \geq 250$ мА	$R_{FI} = 10,5 - 300$ кОм/фазу	$C_{FI} \geq 0,5$ мкФ	$k_{NU} = 0,512 - 0,79$

Рассмотрим относительную степень опасности электропоражения при однополюсном прикосновении человека к фазе электрической сети (например, к фазе А) при различных комбинациях исходного режима утечки тока через фазную изоляцию.

В таблице 3.4 приведены возможные комбинации состояния фаз электрической сети, соответствующие режимам симметричной, однофазной и двухфазной утечек тока. При этом сделаем общее допущение, что уровни сопротивлений фазной изоляции принимают граничные значения 10,5 кОм/фазу и 300 кОм/фазу. Емкость изоляции $C_A = C_B = C_C = 0,1$ мкФ.

Сопротивление фазы, к которой прикоснулся человек ($R_H = 1$ кОм) определяется как эквивалентное сопротивление утечки $R_{\Sigma} = R_A \cdot R_H / (R_A + R_H)$.

Если за критерий принять величину тока I_h , то из всех комбинаций, отличительными являются переходы из симметричного режима утечки тока через изоляцию в однофазную утечку через человека и переходы однофазных утечек в двухфазные – при исходных $R_A = 300$ кОм, $R_B = 10,5$ кОм, $R_C = 300$ кОм и $R_A = 300$ кОм, $R_B = 300$ кОм, $R_C = 10,5$ кОм за счет шунтирования человеком фазы А.

Очевидно, что в случае прикосновения к фазе сети симметричный режим утечки тока через изоляцию переходит в однофазную утечку через человека.

Однако при однофазной утечке с параметрами изоляции $R_A = 10,5$ кОм, $R_B = 300$ кОм, $R_C = 300$ кОм прикосновение к фазе А режим утечки качественно не меняется, т. к. прикосновение происходит именно к поврежденной фазе.

В случае режима двухфазной утечки, когда имеется низкий уровень сопротивления в поврежденных фазах $R_A = 300$ кОм, $R_B = 10,5$ кОм, $R_C = 10,5$ кОм при прикосновении к фазе А возникает режим однофазной утечки, т.к. человек шунтирует фазу с высоким сопротивлением изоляции.

Таким образом, очевиден факт, что при различных комбинациях несимметрии сопротивлений фазной изоляции возможны любые переходы из одного режима утечки в другой и обратно.

Таблица 3.4 – Возможные комбинации состояния фаз электрической сети, соответствующие режимам симметричной, однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию и при однополюсном прикосновении человека к фазе A

Исходный режим утечки тока через изоляцию	R_A , кОм	R_B , кОм	R_C , кОм	Фактический режим утечки	R_{Σ} , кОм	R_B , кОм	R_C , кОм	K_N	I_h , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
симметричный	300	300	300	однофазный	0,997	300	300	0,950	60,6	54,0	9,2	611,2	287,2
симметричный	10,5	10,5	10,5	однофазный	0,913	10,5	10,5	0,850	153,5	142,8	77,9	487,1	287,2
однофазный	10,5	300	300	однофазный	0,913	300	300	0,950	60,6	56,8	16,9	603,8	287,2
однофазный	300	10,5	300	двухфазный	0,997	10,5	300	0,876	135,6	126,3	49,3	530,6	290,1
однофазный	300	300	10,5	двухфазный	0,997	300	10,5	0,912	88,0	81,8	95,2	532,8	284,3
двухфазный	300	10,5	10,5	однофазный	0,997	10,5	10,5	0,850	153,5	132,6	60,8	509,2	284,3
двухфазный	10,5	300	10,5	двухфазный	0,913	300	10,5	0,912	88,0	81,8	95,2	532,8	284,3
двухфазный	10,5	10,5	300	двухфазный	0,913	10,5	300	0,876	135,6	126,3	49,3	530,6	290,1

Анализ данных, приведенных в таблице 3.3 показал, что наиболее опасным является прикосновение к фазе А в случае симметричной утечки тока при минимально допустимом уровне сопротивления изоляции $R_A = R_B = R_C = 10,5 \text{ кОм}$ и двухфазной утечке тока при комбинации $R_A = 300 \text{ кОм}$, $R_B = 10,5 \text{ кОм}$, $R_C = 10,5 \text{ кОм}$. В этом случае ток через человека достигает $I_h = 153,5 \text{ мА}$.

На рисунке 3.39 приведены совмещенные векторные диаграммы токов через человека и напряжения смещения нейтрали при различных комбинациях начального режима утечки и соответствующих уровней сопротивления фазной изоляции.

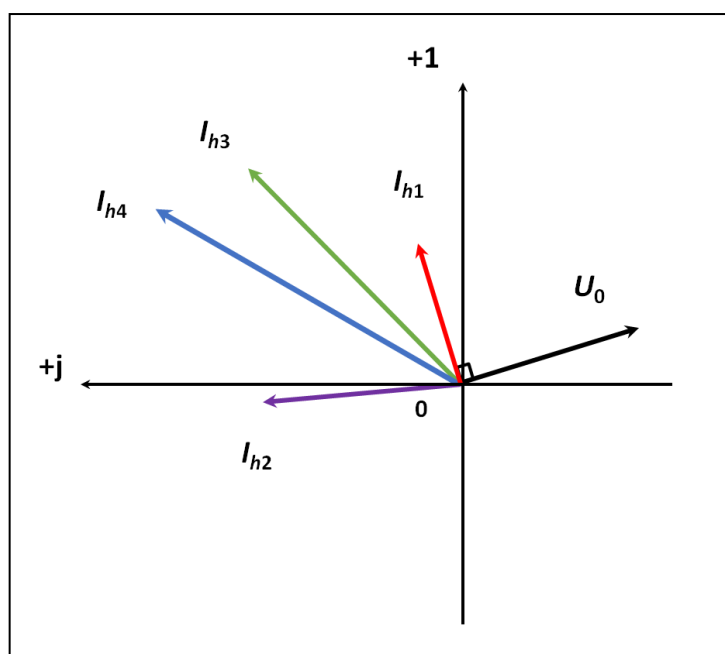


Рисунок 3.39 – Совмещенные векторные диаграммы I_h и U_0 при различных комбинациях начального режима утечки: $I_{h1} = 60,6 \text{ мА}$ – ($R_A = R_B = R_C = 300 \text{ кОм}$); ($R_A = 10,5 \text{ кОм}$, $R_B = R_C = 300 \text{ кОм}$); $I_{h2} = 88 \text{ мА}$ – ($R_A = R_B = 300 \text{ кОм}$, $R_C = 10,5 \text{ кОм}$), ($R_A = R_C = 10,5 \text{ кОм}$, $R_B = 300 \text{ кОм}$); $I_{h3} = 135,6 \text{ мА}$ – ($R_A = R_C = 300 \text{ кОм}$, $R_B = 10,5 \text{ кОм}$), $R_A = R_B = 10,5 \text{ кОм}$, $R_C = 300 \text{ кОм}$); $I_{h4} = 153,5 \text{ мА}$ – ($R_A = R_B = R_C = 10,5 \text{ кОм}$), $R_A = 300 \text{ кОм}$, $R_B = R_C = 10,5 \text{ кОм}$)

В результате выполненного анализа установлено следующее.

1. Для оценки опасности несимметричных режимов, на ряду с известными критериями (предельно допустимый ток через человека $I_{h, \text{доп}}$ или количество электричества $Q_{h, \text{доп}}$), можно дополнительно использовать коэффициент

несимметрии активного сопротивления изоляции k_{NR} и коэффициент несимметрии фазных напряжений k_{NU} .

2. Электрические сети представляют опасность в случаях не только при низких активных сопротивлениях изоляции ($R_I \leq 31,5$ кОм/фазу) и высоких емкостях ($C_I \geq 0,3$ мкФ/фазу), но и при существующей до момента прикосновения несимметрии между фазными напряжениями $k_{NU} = 0,79$.

3. При изменении активного сопротивления изоляции в диапазоне $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу и емкости сети относительно земли $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ/фазу ток I_h изменяется в диапазоне $50,3 - 564,8$ мА. При этом напряжения U_{FA} и U_0 могут увеличиться до фазного значения, а напряжения U_{FB} и U_{FC} возрастают до линейных величин.

4. В случае прикосновения человека к фазе А электрической сети при использовании компенсатора емкости достижение полного резонанса тока утечки в фазах А и В возможно соответственно при емкостях 0,45 мкФ и 0,65 мкФ.

5. Несимметрия активного сопротивления изоляции при определенных комбинациях повышает опасность электротравматизма (например, если сопротивление опережающей фазы меньше, чем сопротивление отстающей фазы по отношению к фазе, в которой произошло прикосновение человека).

6. Снижение опасности электропоражения может быть достигнуто за счет реализации способов и средств непрерывного пофазного контроля активного сопротивления изоляции и эффективной компенсации емкостной составляющей тока утечки.

3.6. Метод и средства пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостной составляющей тока утечки

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих требуемый уровень безопасности в подземных электрических сетях с изолированной нейтралью, является контроль состояния изоляции, осуществляемый на основе измерения параметров активного сопротивления и емкости изоляции сети относительно земли.

Существующие методы измерения указанных параметров позволяют определить лишь величину общего активного и емкостного сопротивлений изоляции [40, 54, 173, 158, 215].

В данной работе предложен способ пофазного определения сопротивления изоляции сети относительно земли, основанный на измерении комплексов токов в ветвях фильтра напряжения нулевой последовательности [273, 274].

Принципиальная схема устройства для реализации способа приведена на рисунке 3.40. При выводе расчетных соотношений принималось допущение, что сеть работает в режиме холостого хода, что накладывает свои ограничения при измерениях.

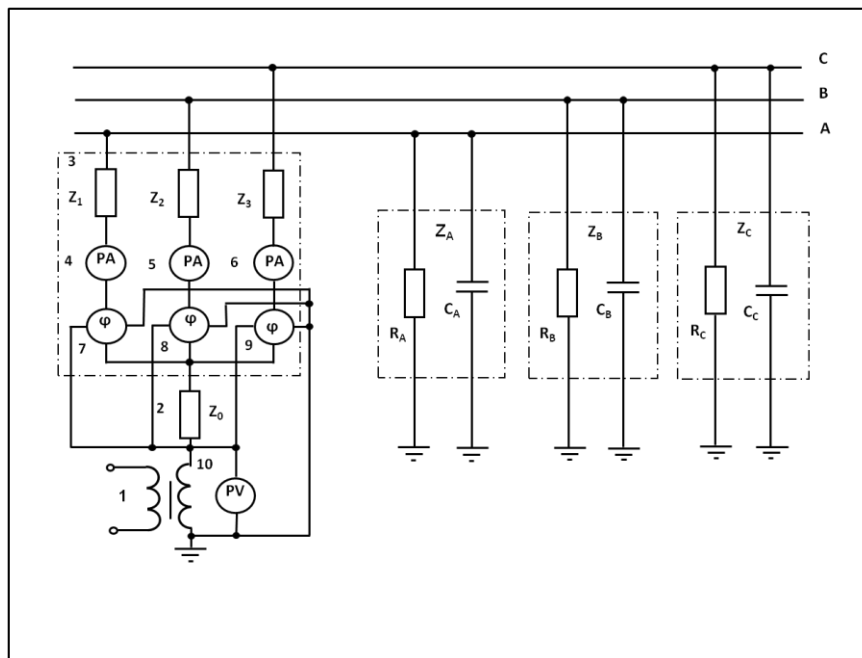


Рисунок 3.40 – Метод пофазного контроля сопротивления изоляции

Сущность способа заключается в том, что в сеть подается напряжение от независимого источника питания, включенного последовательно с токоограничивающим элементом между землей и общей точкой фильтра напряжения нулевой последовательности (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.

Устройство содержит источник питания 1, токоограничивающий элемент 2, фильтр 3 ФННП. В качестве этих сопротивлений, а также токоограничивающего – элемента 2 могут использоваться резисторы, емкости или индуктивности. Последовательно с сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3 включены измерители тока 4, 5, 6 и токовые обмотки фазометров 7, 8, 9. Обмотки напряжения фазометров 7, 8, 9 и вольтметр 10 включены параллельно источнику питания 1. ФННП 2 подключается к фазам сети A, B, C . На рисунке 3.40 показаны также сопротивления изоляции фаз сети относительно земли Z_A, Z_B, Z_C , состоящие из параллельно соединенных активных R_A, R_B, R_C и емкостных X_A, X_B, X_C сопротивлений.

Указанной схеме соответствует приведенная на рисунке 3.41 комплексная схема замещения и векторная диаграмма токов и напряжений (рисунок 3.42).

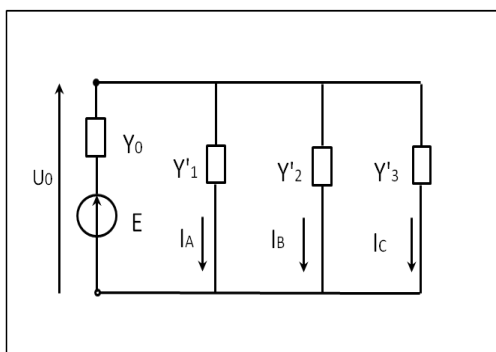


Рисунок 3.41 – Комплексная схема замещения

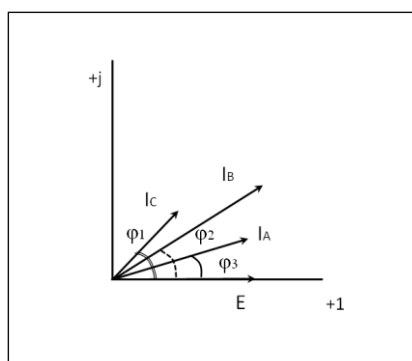


Рисунок 3.42 – Векторная диаграмма токов и напряжений

Поскольку величина емкостного сопротивления изоляции определяется главным образом длиной линии и сечением кабеля, то справедливо допущение о

равенстве емкостных сопротивлений изоляции отдельных фаз между собой, т.е. случай $X_A = X_B = X_C$, $R_A \neq R_B \neq R_C$. Возможен также вариант $X_A \neq X_B \neq X_C$, $R_A = R_B = R_C$.

Способ реализуется следующим образом на примере описания работы устройства.

Устройство подключают к фазам сети, после чего измеряют напряжение источника питания посредством вольтметра, токи в ветвях ФННП посредством измерителей тока 4, 5, 6 и их фазы относительно напряжения источника питания с помощью фазометров 7, 8, 9.

По измеренным величинам токов I_1 , I_2 , I_3 и углов сдвига фаз φ_1 , φ_2 , φ_3 определяют комплексы токов в ветвях ФННП:

$$\dot{I}_A = I_1 e^{j\varphi_1}, \dot{I}_B = I_2 e^{j\varphi_2}, \dot{I}_C = I_3 e^{j\varphi_3}. \quad (3.1)$$

Напряжение между нулевой точкой фильтра напряжения нулевой последовательности и землей находится следующим образом:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E} \underline{Y}_0}{\underline{Y}'_1 + \underline{Y}'_2 + \underline{Y}'_3 + \underline{Y}'_0}.$$

где $\dot{E} = E e^{j\varphi}$ – комплекс напряжения источника питания 1, начальную фазу которого полагаем равной нулю $\varphi_0 = 0$; $\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0}$ – комплекс проводимости токоограничивающего элемента 2, См; $\underline{Y}'_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_A}$, $\underline{Y}'_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_B}$, $\underline{Y}'_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_C}$ – комплексы расчетных проводимостей.

На основании закона Ома токи определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{U}_0 \underline{Y}'_1 = \frac{\dot{E} \underline{Y}_0}{\underline{Y}'_1 + \underline{Y}'_2 + \underline{Y}'_3} \underline{Y}'_1; \\ \dot{I}_B = \dot{U}_0 \underline{Y}'_2 = \frac{\dot{E} \underline{Y}_0}{\underline{Y}'_1 + \underline{Y}'_2 + \underline{Y}'_3} \underline{Y}'_2; \\ \dot{I}_C = \dot{U}_0 \underline{Y}'_3 = \frac{\dot{E} \underline{Y}_0}{\underline{Y}'_1 + \underline{Y}'_2 + \underline{Y}'_3} \underline{Y}'_3. \end{cases} \quad (3.2)$$

С учетом того, что токи I_A , I_B , I_C известны из результатов измерений, после преобразований выражений (3.2) получаем систему из трех уравнений с тремя неизвестными относительно расчетных проводимостей \underline{Y}'_1 , \underline{Y}'_2 , \underline{Y}'_3 :

$$\begin{cases} (\dot{E}Y_0 - i_A)Y_1' - i_A Y_2' - i_A Y_3' = i_A Y_0; \\ (\dot{E}Y_0 - i_B)Y_1' - i_B Y_2' - i_B Y_3' = i_B Y_0; \\ (\dot{E}Y_0 - i_C)Y_1' - i_C Y_2' - i_C Y_3' = i_C Y_0. \end{cases} \quad (3.3)$$

Решая систему уравнений (3.3) получаем:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{i_A Y_0}{\dot{E}Y_0 - i_A - i_B - i_C}; \\ Y_2 = \frac{i_B Y_0}{\dot{E}Y_0 - i_A - i_B - i_C}; \\ Y_3 = \frac{i_C Y_0}{\dot{E}Y_0 - i_A - i_B - i_C}. \end{cases} \quad (3.4)$$

На основании выражений (3.1), (3.2), (3.4) величины полных сопротивлений изоляции каждой фазы сети определяется следующим образом:

$$\begin{cases} Z_A = \frac{1}{Y_1'} - Z_1 = \frac{\dot{E}Y_0 - i_1 e^{j\varphi_1} - i_2 e^{j\varphi_2} - i_3 e^{j\varphi_3}}{i_1 e^{j\varphi_1} Y_0} - Z_1; \\ Z_B = \frac{1}{Y_2'} - Z_2 = \frac{\dot{E}Y_0 - i_1 e^{j\varphi_1} - i_2 e^{j\varphi_2} - i_3 e^{j\varphi_3}}{i_2 e^{j\varphi_2} Y_0} - Z_2; \\ Z_C = \frac{1}{Y_3'} - Z_3 = \frac{\dot{E}Y_0 - i_1 e^{j\varphi_1} - i_2 e^{j\varphi_2} - i_3 e^{j\varphi_3}}{i_3 e^{j\varphi_3} Y_0} - Z_3. \end{cases} \quad (3.5)$$

Зная комплексы полных сопротивлений изоляции фаз можно разложить их на активные R_A, R_B, R_C и емкостные X_A, X_B, X_C составляющие

$$\begin{aligned} R_A &= (ReY_A)^{-1}; R_B = (ReY_B)^{-1}; R_C = (ReY_C)^{-1}; \\ X_A &= (ImY_A)^{-1}; X_B = (ImY_B)^{-1}; X_C = (ImY_C)^{-1}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $Y_A = \frac{1}{Z_A}$, $Y_B = \frac{1}{Z_B}$, $Y_C = \frac{1}{Z_C}$ – комплексы полных проводимостей изоляции фаз A, B, C сети, См; $ReY_A, ReY_B, ReY_C, ImY_A, ImY_B, ImY_C$ – соответственно действительности и мнимые части комплексов Y_A, Y_B, Y_C .

Учитывая функциональные возможности разработанного устройства контроля целесообразно его использование в качестве источника входных сигналов и исходной информации о состоянии изоляции электроустановок при создании автоматизированных систем управления ЭТКС [71]. Одной из функций, возлагаемых на данную систему, является (учитывая ее значение для обеспечения

надежности, безаварийности и безопасности при эксплуатации электроустановок с изолированной нейтралью) контроль состояния изоляции.

На рисунке 3.43 приведена структурная схема контроля параметров сопротивления изоляции. В состав схемы входят: входные преобразователи, регистры хранения информации, приемо-передающий усилитель, управляющий контроллер и центральный процессор с блоками индикации, а также блок управления выключателем.

Выходные преобразователи служат для нормирования и преобразования исходных аналоговых сигналов, получаемых с устройства, в цифровые, пригодные для дальнейшего хранения и обработки.

Регистры хранения информации предназначены для хранения значений параметров, принимаемых от входных преобразователей, а также выдачи их на управляющий контроллер. Управляющий контроллер обеспечивает оперативный контроль состояния изоляции в реальном масштабе времени на основе программы, записанной в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и реализующей алгоритм расчета измеряемых параметров сети, а также осуществляет связь и обмен информацией через приемо-передающий усилитель с центральным процессором.

Такое построение схем позволяет обеспечить высокую надежность функционирования системы, поскольку автономная работа управляющего контроллера не прерывается при аварии на линии связи или центрального диспетчерского пульта, т.е. при пропадании возможности обмена информацией с центральным процессором. Вместе с тем достигается высокая гибкость, т.к. центральный процессор может не только выдавать значения контролируемых параметров, но и в случае необходимости изменять программу работы микроконтроллера, а в некоторых случаях брать управление на себя.

Приемо-передающий усилитель обеспечивает необходимую помехоустойчивость при передаче информации по линиям связи.

Посредством блоков индикации, по мере необходимости, осуществляется визуальное отображение численных значений контролируемых параметров.

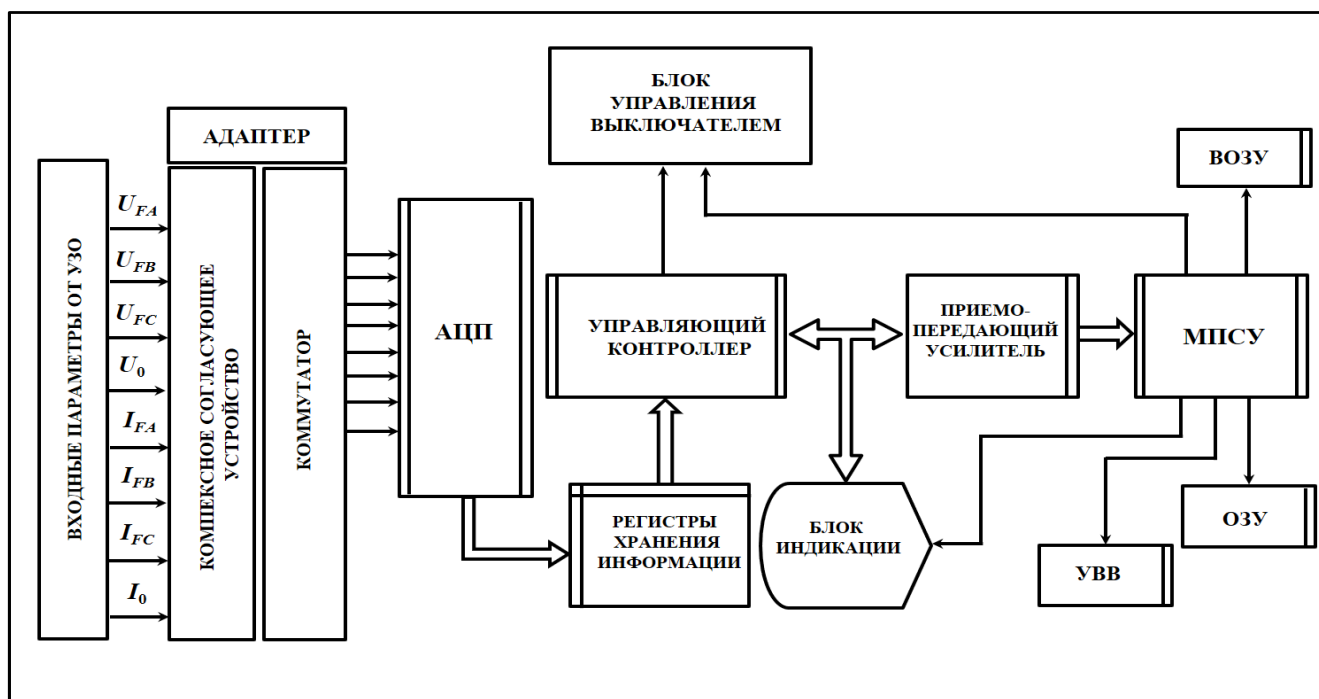


Рисунок 3.43 – Структурная схема устройства контроля изоляции

При недопустимом снижении сопротивления изоляции электрической сети, выявляемого на основе сравнения текущего значения с уставкой, заложенной в программу, управляющий контроллер или центральный процессор осуществляют выдачу соответствующего сигнала на блок управления выключателем, и защищаемая сеть, таким образом отключается.

Для протяженных подземных электрических сетей характерна значительная емкость фазной изоляции сети относительно земли, вследствие этого ток утечки носит преимущественно емкостной характер. В этом случае в электрической сети резко снижается способность обеспечения требуемого уровня безопасности за счет поддержания высокого активного сопротивления изоляции. Фактически изоляция утрачивает свои защитные свойства в случае непосредственного прикосновения человека к фазе электрической сети.

В современных УЗО реализуется только общая компенсация емкостного тока утечки в электрической сети с изолированной нейтралью трансформатора, способы реализации которой рассмотрены в главе 1. В данных схемах достижение резонансного значения индуктивности рабочей обмотки невозможно, так как условия резонанса тока утечки в различных фазах сети не совпадают.

Автором разработана полезная модель в виде устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях [284].

Полезная модель относится к средствам защиты, в частности к устройствам автоматической компенсации емкостных токов утечек, и предназначено для снижения токов утечки в подземных электрических сетях путем пофазной автоматической компенсации их емкостных составляющих.

В известных устройствах автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки, состоящих из управляемого постоянным током компенсирующего дросселя насыщения с положительной обратной связью обеспечивается компенсация полного емкостного тока, соответствующего симметричному режиму утечки. В случае возникновения несимметричных режимов утечки тока через изоляцию условия возникновения резонанса в контурах, образованных активным сопротивлением и емкостью изоляции отдельных фаз, не совпадают или полностью отсутствуют, что при автоматической настройке компенсирующего дросселя на полный емкостной ток утечки приводит к его недокомпенсации.

Техническим результатом, достигаемым в полезной модели, является возможность компенсации фазных емкостных токов утечки через изоляцию электрической сети при возникновении несимметричных режимов утечки, защита человека от поражения электрическим током в случае его прикосновения к токоведущим частям или корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением.

Технический результат достигается тем, что устройство автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях, содержащее емкостной фильтр между искусственной нулевой точкой которого и землей включена балластная емкость, измерительный трансформатор напряжения, выпрямитель, усилитель постоянного тока в обмотке управления компенсирующего дросселя и выпрямитель для питания обмотки обратной связи, которые последовательно подключены между искусственной нулевой точкой

активно-индуктивного фильтра и землей, для обеспечения полной компенсации в несимметричных режимах утечки снабжено измерительными трансформаторами тока, включенными в фазные цепи емкостного фильтра, выпрямителями и усилителями постоянного тока в обмотках управления двухтактными магнитными усилителями, рабочие обмотки которых включены в фазные цепи активно-индуктивного фильтра.

Полезная модель поясняется чертежом, где на рисунке 3.44 представлена структурная схема устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях.

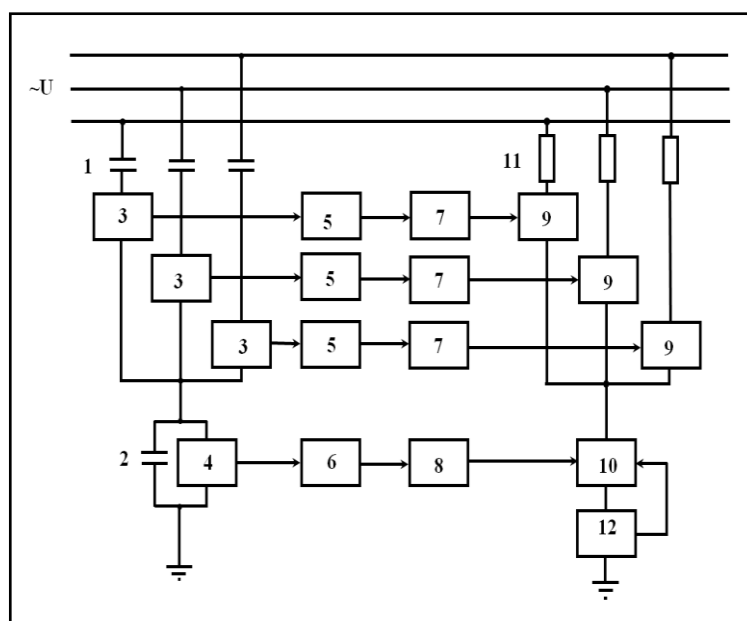


Рисунок 3.44 – Устройство автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях

Предлагаемое устройство содержит емкостной фильтр 1 между искусственной нулевой точкой которого и землей включена балластная емкость 2, измерительный трансформатор напряжения 4, выпрямитель 6, усилитель 8 постоянного тока в обмотке управления компенсирующего дросселя 10 и выпрямитель 12 для питания обмотки обратной связи, которые последовательно подключены между искусственной нулевой точкой активно-индуктивного фильтра 11 и землей, измерительные трансформаторы тока 3, включенные в фазные цепи емкостного фильтра 1, выпрямители 5 и усилители 7 постоянного

тока в обмотках управления двухтактными магнитными усилителями 9, рабочие обмотки которых включены в фазные цепи активно-индуктивного фильтра 11.

Для пояснения работы на рисунке 3.45 приведена принципиальная электрическая схема устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки, в которой с целью упрощения показан один фазный канал 3 – 5 – 7 управления индуктивностью рабочих обмоток двухтактного магнитного усилителя 9.

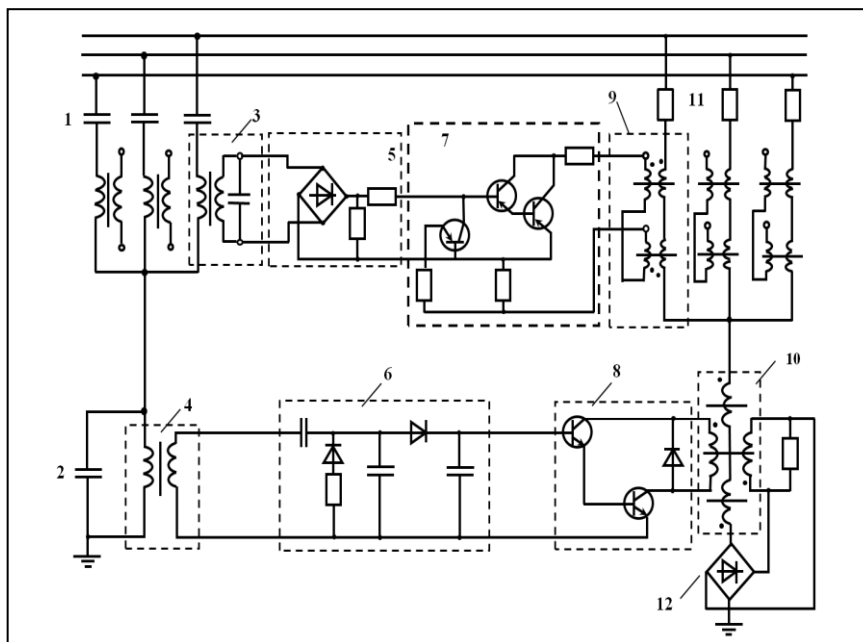


Рисунок 3.45 – Принципиальная электрическая схема устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки

Устройство работает следующим образом.

Для компенсации полного емкостного тока в симметричном режиме утечки между искусственной нулевой точкой емкостного фильтра 1 и землей параллельно подключаются балластная емкость 2 и первичная обмотка измерительного трансформатора напряжения 4, которые образуют резонансный *LC*-контур для формирования сигнала, пропорционального полному емкостному току утечки.

Со вторичной обмотки трансформатора напряжения 4 управляющий сигнал через блокирующий активную составляющую тока утечки *RC*-фильтр выпрямителя 6 и усилитель 8 постоянного тока поступает на обмотку управления

компенсирующим дросселем 10. Для защиты транзисторов усилителя 6 от обратных напряжений обмотка управления компенсирующим дросселем 10 зашунтирована диодом. Для улучшения рабочей характеристики компенсатора в зоне малых емкостей параллельно обмотке обратной связи компенсирующего дросселя 10 и питающему её выпрямителю 12 подключен шунтирующий резистор. Таким образом, при изменении управляющего сигнала рабочая индуктивность компенсирующего дросселя 10 автоматически настраивается в резонанс с полной емкостью изоляции сети относительно земли.

Для компенсации емкостного тока в несимметричном режиме утечки в фазные ветви емкостного фильтра 1 подключаются первичные обмотки измерительных трансформаторов тока 3, с которых снимаются сигналы пропорциональные значениям фазных емкостных токов утечки. Вторичные обмотки трансформаторов тока 3 и параллельно подключенные к ним емкости, образуют LC -контур для фильтрации активной составляющей фазного тока утечки и формирования сигналов, пропорциональных фазным емкостным токам утечки, которые подаются на выпрямители 5 и усилители 7 постоянного тока. Усиленные сигналы постоянного тока поступают на управляющие обмотки двухтактных магнитных усилителей 9, рабочие обмотки которых включены в фазные ветви активного фильтра присоединения 11. В случае несимметрии сопротивлений фазной изоляции сети относительно земли управляющие сигналы изменяются пропорционально изменению токов в ветвях емкостного фильтра 1, в результате чего по обмоткам управления двухтактных магнитных усилителей 9 протекают токи, приводящие изменению магнитной проницаемости их рабочих обмоток. Таким образом, рабочая индуктивность каждого двухтактного магнитного усилителя 9 настраивается в резонанс с емкостью соответствующей фазы. Применение двухтактных магнитных усилителей 9 с обмотками управления, представляющими собой две встречно включенные полуобмотки, позволяют обеспечить более стабильный управляющий сигнал, изменяющийся в широком диапазоне регулирования насыщения их рабочих обмоток, следовательно, более полной компенсации фазных емкостных токов утечки.

3.7. Выводы

В результате выполненных научных исследований несимметричных режимов утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях промышленной частоты сделаны следующие выводы.

1. При анализе переходных процессов при несимметричных режимах утечки тока целесообразно представлять фазную изоляцию в виде двухполюсника, частью которого является эквивалентный диэлектрик, электрические параметры которого определяются виде сосредоточенных фазных активных сопротивлений и емкостей фаз, а также параметров цепей утечки, определяемых процессами низкочастотных поляризаций.

В качестве основного параметра предлагается использовать постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в контурах изоляции, для которых установлены соответствующие параметрические зависимости.

2. Разработанная математическая модель для анализа несимметричных режимов утечки тока позволяет выполнить качественную и количественную оценку характеру изменения фазных напряжений и соответствующих токов утечки при различных комбинациях параметров изоляции электрической сети.

В качестве критерия для анализа несимметричных режимов предложено использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений, позволяющий определить степень потенциальной опасности уровня сопротивления изоляции.

3. Моделирование режимов утечки тока позволило установить взаимосвязь между фазными напряжениями и напряжением нулевой последовательности, качественные и количественные показатели которой положены в реализацию способа пофазного контроля сопротивления изоляции электрической сети. устройства сигнализации несимметрии фазных напряжений.

4. Для режима двухфазной утечки несимметрия фазных напряжений выражена в меньшей степени, чем при однофазной, однако при этом качественно изменяется характер распределения и изменения фазных напряжений.

При переходе из режима однофазной утечки в режим двухфазной утечки вектор напряжения нулевой последовательности относительно вектора

напряжения поврежденной фазы изменяет свое направление практически на 180° и перемещается из третьего квадранта системы координат в первый.

5. Установлено, что несимметрия активного сопротивления изоляции при определенных комбинациях параметров изоляции повышает опасность электротравматизма.

В случае прикосновения человека к фазе электрической сети возможен переход из режима однофазного в более тяжелый двухфазный режим утечки. При этом, если сопротивление опережающей фазы меньше, чем сопротивление отстающей фазы по отношению к фазе, в которой произошло прикосновение величина тока через человека возрастает на 15 – 20 %.

6. Анализ режимов однофазных режимов утечки при различных комбинациях параметров изоляции показал, что условие полного резонанса тока утечки достигается только в двух фазах, но на различных уровнях емкости. В третьей фазе такие условия не возникают. Таким образом, имеет место квазирезонансный режим, что значительно ухудшает защитные свойства изоляции сети.

7. Обоснован метод оценки степени опасности режимов утечки в подземных электрических сетях, отличающийся комплексным учетом несимметрии фазных напряжений относительно земли, составляющих сопротивления изоляции, уровня тока и длительности воздействия на человека за время срабатывания устройств защитного отключения и генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

8. Обоснован метод пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостного тока в подземных электрических сетях с учетом степени несимметрии фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров активного и емкостного сопротивления изоляции электрической сети в несимметричных режимах утечки.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

4.1. Исходные положения

В настоящее время на современных шахтах интенсивно внедряется прогрессивная система управления наиболее мощными электроприводами, требующими регулирования скорости электродвигателей как в режиме пуска, так и непосредственно в процессе ведения горных работ (очистные комбайны, выносные системы подачи, скребковые и ленточные конвейеры и др.).

К таким системам относится применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на основе преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения (ПЧ-АД с АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

В целях повышения энергоресурса горных машин и энергоэффективности ведения горных работ необходимо обеспечение нормативных показателей качества электроэнергии в ПКЭС с учетом отрицательного воздействия высших гармонических составляющих напряжения и тока в силовых цепях.

Рост единичной установленной мощности электродвигателей (до 600 кВт и выше) явился основанием для перевода питающей электрической сети некоторых участков с напряжения 660 В на 1140 В и 3,3 кВ, что в свою очередь, повышает требования к коммутационной аппаратуре и УЗО в плане быстродействия (до 0,15 с) и обеспечения эффективности их работы при различных режимах утечки тока через изоляцию.

В подземной комбинированной электрической сети (ПКЭС) применяются серийно выпускаемые УЗТУ серии АЗУР, предназначенные для работы в сетях промышленной частоты. Целью исследований, приведенных в данной главе, является определение степени влияния частотно-регулируемого электропривода, фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) и синус-фильтров (СФ) на

эффективность работы УЗО и разработка рекомендаций по совершенствованию средств защитного отключения.

Предметом исследования являются процессы, происходящие в изоляции и в схеме замещения УЗО в режимах симметричной и однофазной утечки тока для трех вариантов комплектования подземного участка электрической сети, оборудованной УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения и компенсатором емкостного тока, реакторами и ФКУ, подключенными до преобразователя частоты (ПЧ), реакторами и СФ, подключенными после ПЧ перед асинхронным электродвигателем (АД):

- ПКЭС-1 – питание АД от энергопоезда в составе силового трансформатора и ПЧ по кабельной линии протяженностью до 600 м (скребковый конвейер);

- ПКЭС-2 – питание блока ПЧ-АД от силового трансформатора по кабельной линии протяженностью до 600 м (очистной комбайн, привод системы подачи);

- ПКЭС-3 – питание ПЧ от силового трансформатора по магистральному кабелю протяженностью до 400 м, а от ПЧ до АД – кабелем протяженностью до 600 м и более (ленточный конвейер).

Исследование проводилось на имитационных моделях, синтезированных на основе методов анализа режимов утечки тока в подземных электрических сетях горных предприятий, приведенных во второй главе диссертации.

Основными задачами, решаемыми в данной главе, являются следующие.

1. Анализ режимов утечки тока через изоляцию на различных участках ПКЭС с целью определения уровней токов, фазных напряжений сети относительно земли и оценка степени их несимметрии с учетом влияния высших гармонических составляющих, генерируемых электродвигателем.

2. Анализ уровней токов и фазных напряжений ветвях фильтра присоединения, тока нулевой последовательности и напряжения смещения нейтрали в цепи измерителя УЗО при различных режимах утечки тока через

изоляцию с целью установления степени влияния высших гармонических составляющих, генерируемых в системе ПЧ-АД на эффективность работы УЗО.

3. Анализ потенциальной опасности поражения человека электрическим током в ПКЭС.

4. Оценка эффективности работы компенсатора емкостного тока утечки УЗО при различных вариантах построения ПКЭС.

5. Разработка способов и средств защитного отключения при различных вариантах построения ПКЭС.

4.2. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания скребкового конвейера

Одним из вариантов комбинированной подземной электрической сети является схема питания электродвигателя скребкового конвейера. Трансформатор и ПЧ находятся в составе энергопоезда, установленного на максимальном приближении к лаве (не ближе 50 м от сопряжения забоя и вентиляционного штрека). На участке с напряжением промышленной частоты и цепи постоянного тока ПЧ активное сопротивление изоляции $R_I > 300$ кОм/фазу, а емкость $C_I \approx 0$. Длина питающего кабеля (КЛ) от преобразователя частоты до удаленных электродвигателей конвейера определяется протяженностью лавы (400 – 600 м), поэтому активное сопротивление R_I принято в пределах от 31,5 до 300 кОм/фазу, а емкость C_I – до 1 мкФ/фазу. УЗО включено после автоматического выключателя перед ПЧ.

На рисунке 4.1 приведена синтезированная имитационная модель участка ПКЭС напряжением $U_F = 660$ В, оборудованной УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения, компенсатором емкостного тока утечки, фильтро-компенсирующими устройствами, реакторами и синус-фильтром.

В зависимости от решаемой задачи модель может корректироваться не только по параметрам схемы, но и по её элементному составу. Например, при применении СФ можно отключить ФКУ, и наоборот. Место подключения

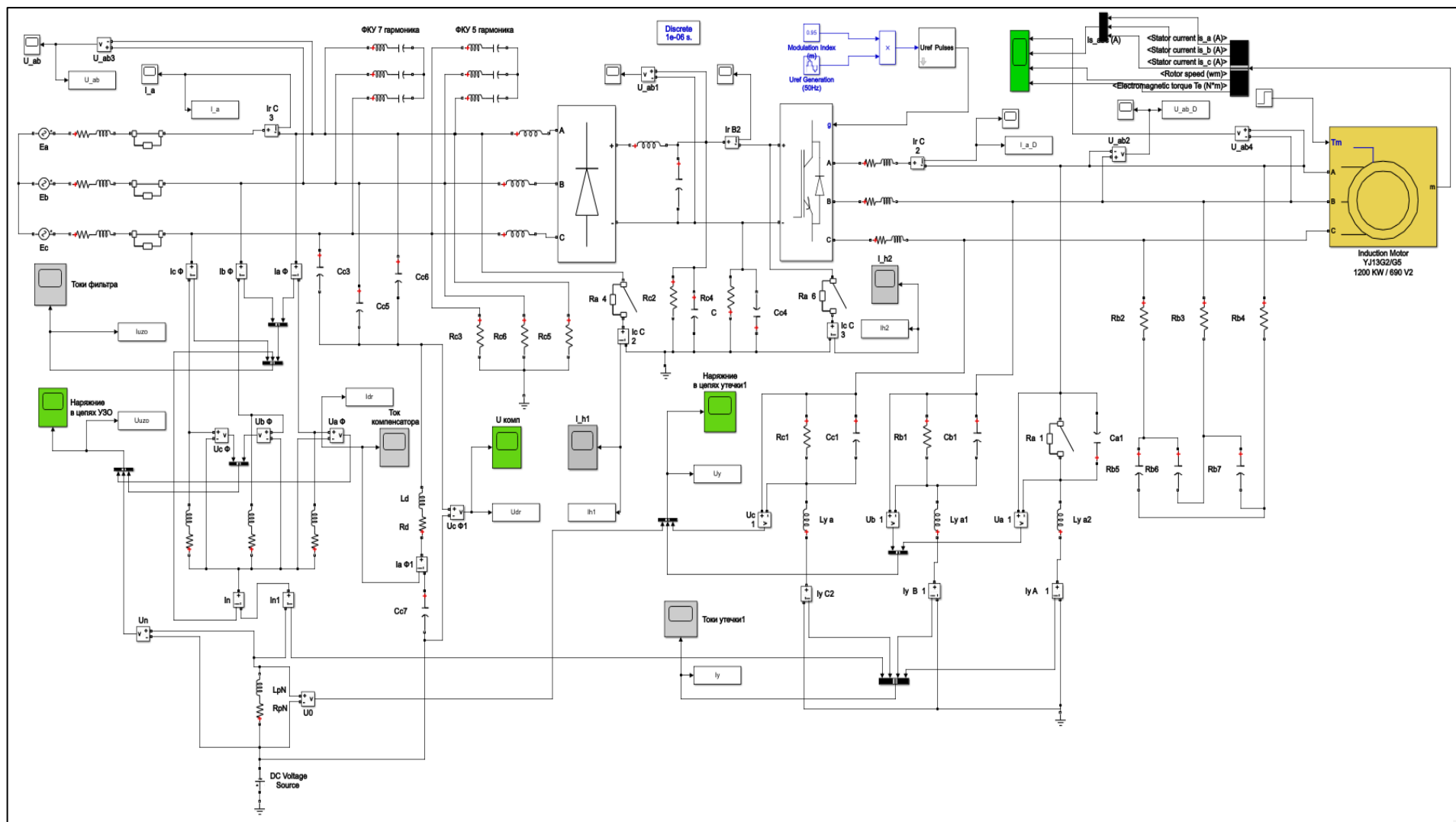


Рисунок 4.1 – Имитационная модель участка ПКЭМ, оборудованной УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения, компенсатором емкостного тока утечки, ФКУ, реакторами и синус-фильтром

компенсатора емкостного тока утечки может быть установлено как до, так и после преобразователя частоты или, при малых емкостях изоляции, этот элемент может быть отключен.

На рисунках 4.2 и 4.3 приведены результаты гармонического анализа фазных токов и междуфазных напряжений в силовых цепях до и после преобразователя частоты без ФКУ и реакторов (режим максимальных искажений), с реакторами и ФКУ настроенными на 5-ю и 7-ю гармоники, с синус-фильтром и реакторами подключенными на участке преобразователь частоты – кабельная линия – асинхронный электродвигатель (ПЧ – КЛ – АД).

Применение ФКУ и реакторов, а также СФ положительно сказывается на качестве электроэнергии, поступающей к электродвигателю через ПЧ.

При использовании ФКУ и реакторов для фазных напряжений силовой сети коэффициенты 5-ой гармонической составляющей $K_{U(5)}$ снижаются с 7% до 0,1%, 7-й гармонической составляющей $K_{U(7)}$ – с 3,5% до 0,16%. Для фазных токов коэффициенты 5-ой гармонической составляющей снижаются с 23% до 0,35%, 7-й гармонической составляющей – с 7,5% до 0,4%. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U (%) снижается с 8,05% до 0,29%, Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (%) снижается с 23,6% до 1,15%.

Дополнительная установка после преобразователя частоты реактора и синус-фильтра приводит к еще большему снижению показателя K_U до 0,22%, а K_I – до 0,61%.

При этом предварительный анализ показал, что наличие ФКУ и реакторов перед ПЧ оказывает незначительное влияние на гармоники, наводимые в токах утечки и фазных напряжениях сети относительно земли. Гармонический состав токов и напряжений в цепях утечки и в ветвях фильтра УЗО определяется в основном параметрами модулированного напряжения после ПЧ.

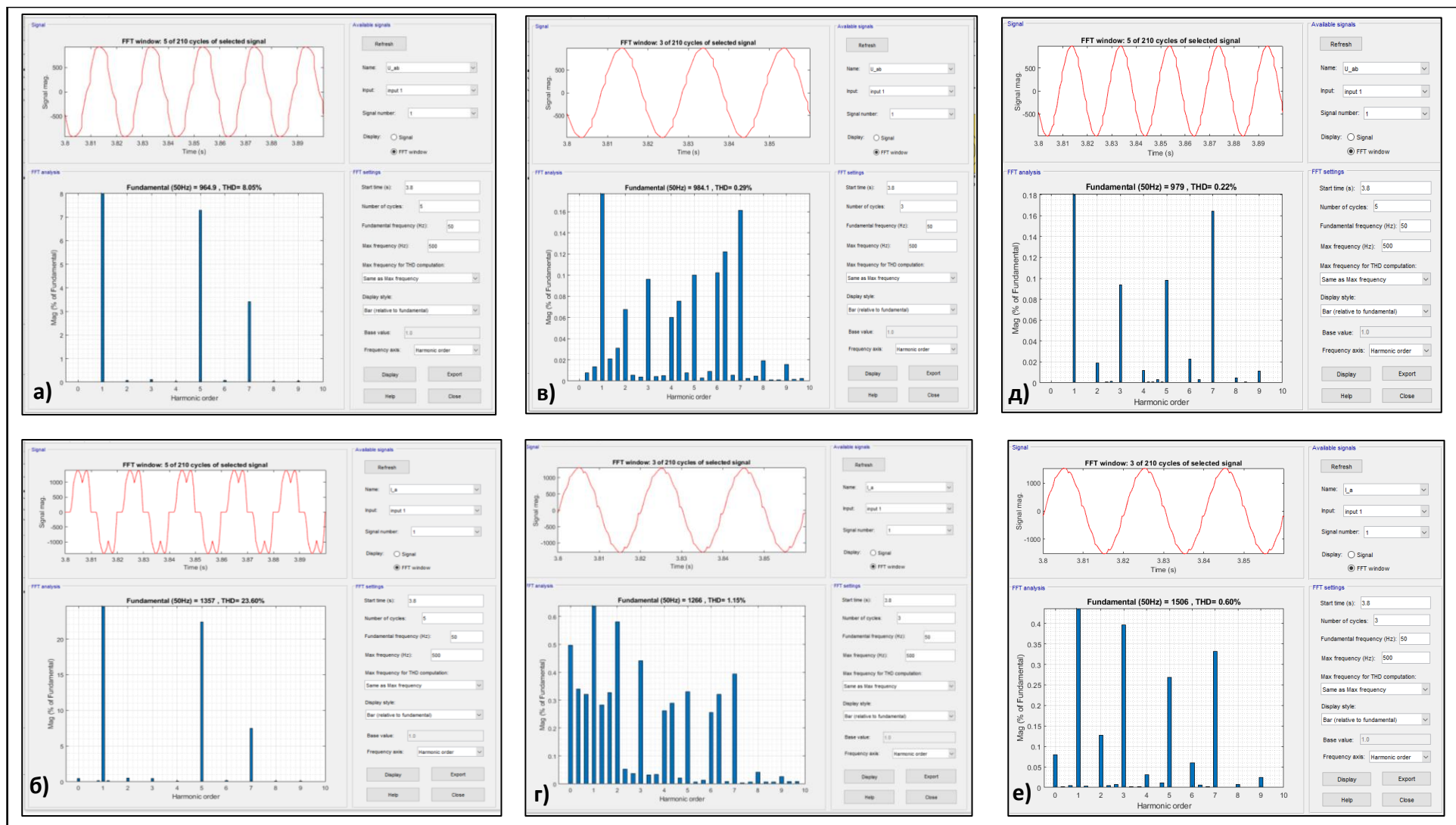


Рисунок 4.2 – Гармонические показатели напряжения и тока силовой линии ПКЭС на участке до ПЧ: а, б) – сеть без компенсаторов и реакторов; в, г) – сеть с ФКУ и реакторами; д, е) – сеть с ФКУ, реакторами и синусным фильтром

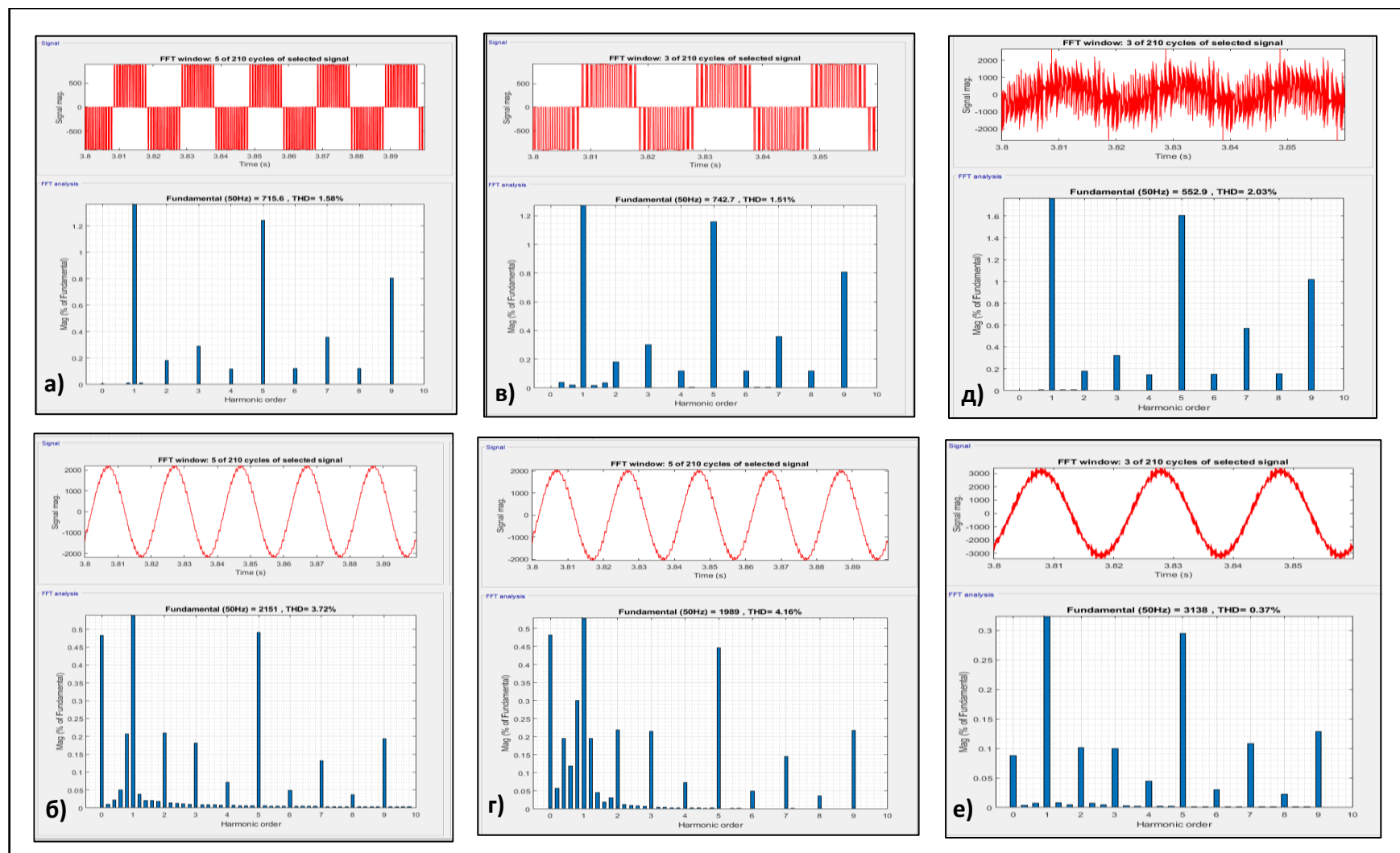


Рисунок 4.3 –Гармонические показатели напряжения и тока силовой линии ПКЭС на участке после ПЧ: а, б) – сеть без компенсаторов и реакторов; в, г) – сеть с ФКУ и реакторами; д, е) – сеть с ФКУ, реакторами и синусным фильтром

Следует отметить, что на коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , наводимых в цепях утечки тока через изоляцию, в ветвях фильтра УЗО и компенсаторе емкостного тока утечки, действие ГОСТ 32144-2013 не распространяется, т.к. он относится к показателям нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

На рисунке 4.4 представлены характерные осциллограммы напряжений сети относительно земли в режиме однофазной утечки тока в фазе А при наличии реактора и ФКУ, подключаемых между трансформатором и ПЧ (рисунк 4.4, а, б), а также реактора и синус-фильтра, подключаемых после ПЧ (рисунк 4.4, в, г).

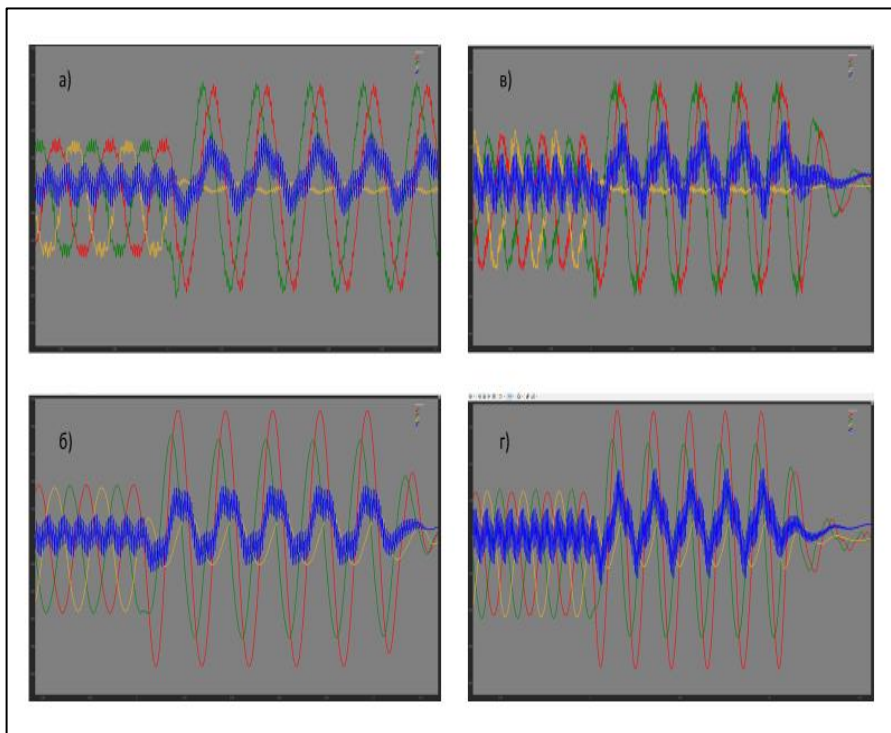


Рисунок 4.4 – Осциллограммы напряжений в режиме однофазной утечки тока в фазе А при $R_I = 180$ кОм/фазу: ФКУ включено – а) $C_I = 0,05$ мкФ, б) $C_I = 0,5$ мкФ; СФ включен – в) $C_I = 0,05$ мкФ, г) $C_I = 0,5$ мкФ

Применение СФ после ПЧ приводит к формированию в цепях утечки и УЗО сигналов близких к синусоидальной форме. Вместе с тем наличие в сети СФ практически не меняет спектральный состав высших гармонических составляющих токов и напряжений в цепях утечки и ветвях фильтра УЗО.

В рабочем режиме применение ФКУ и СФ обеспечивает необходимое качество электроэнергии в подземной комбинированной сети и может быть предложено к практической реализации при условии выполнения требований, предъявляемых к взрывозащищенному электрооборудованию шахт. Одним из ключевых условий является обеспечение температурного контроля внутри корпусов ФКУ и СФ при максимально возможном отводе тепла.

Для оценки степени влияния высших гармонических составляющих напряжения и тока цепях фильтра УЗО были проведены исследования на представленной выше модели (рисунок 4.1) в режимах симметричной и однофазной утечки тока в ПКЭС.

Результаты измерений амплитудных и действующих значений токов и напряжений в ветвях фильтра УЗО приведены в Приложении П1 (таблица П1.22).

На рисунках 4.5 и 4.6 приведены характерные осциллограммы напряжений и токов в ветвях присоединения и цепи измерителя УЗО для данного типа ПКЭС при включении УЗО после силового трансформатора перед ПЧ.

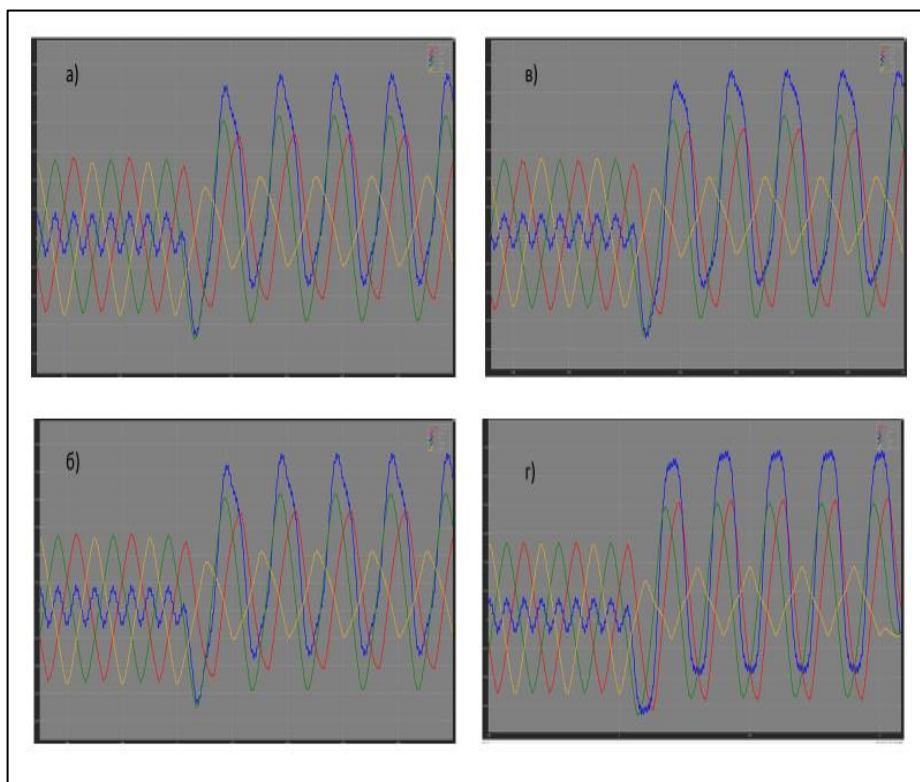


Рисунок 4.5 – Осциллограммы токов в ветвях фильтра УЗО в режиме однофазной утечки тока в фазе А при $R_I = 180$ кОм/фазу: а) $C_I = 0,05$ мкФ, б) $C_I = 0,15$ мкФ, в) $C_I = 0,25$ мкФ, г) $C_I = 0,5$ мкФ

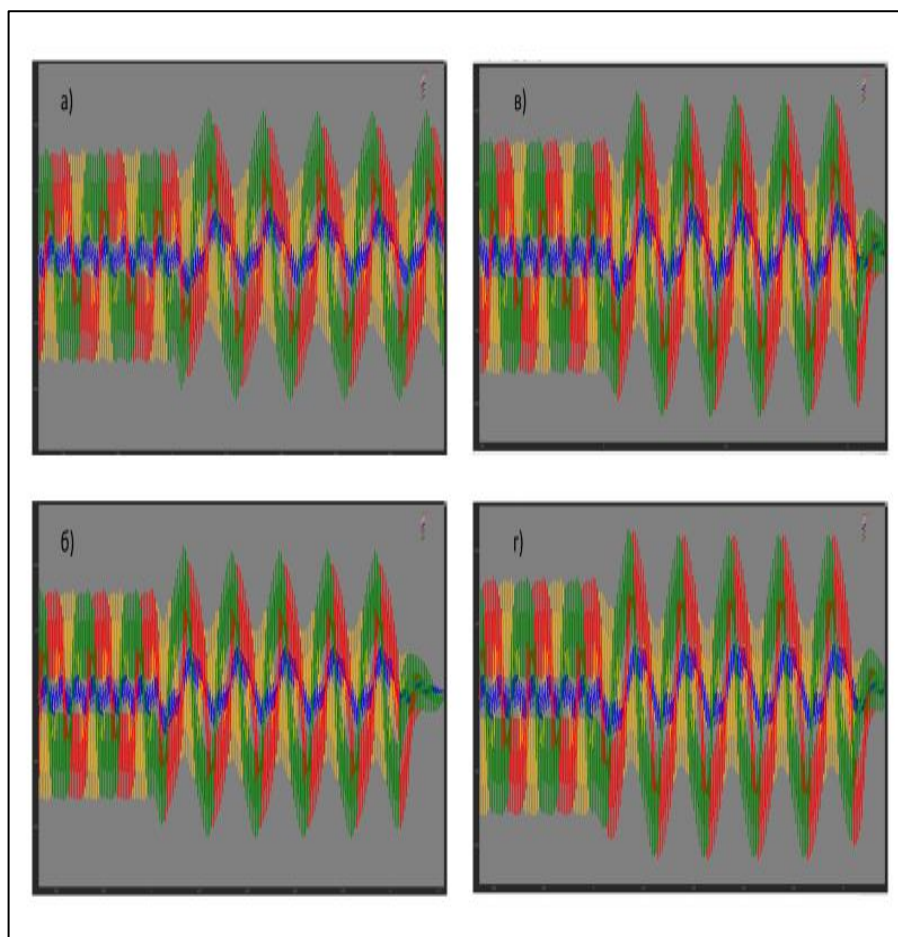


Рисунок 4.6 – Осциллограммы напряжений в ветвях фильтра УЗО в режиме однофазной утечки тока в фазе А при $R_I = 180 \text{ кОм/фазу}$: а) $C_I = 0,05 \text{ мкФ}$, б) $C_I = 0,15 \text{ мкФ}$, в) $C_I = 0,25 \text{ мкФ}$, г) $C_I = 0,5 \text{ мкФ}$

Для заданных параметров ПКЭС в режиме однофазной утечки при изменении емкости от 0,05 до 0,5 мкФ/фазу действующие значения токов в ветвях фильтра УЗО изменяются в пределах $I_{FA} = 5,05 - 8,8 \text{ мА}$, $I_{FB} = 22,5 - 28,3 \text{ мА}$, $I_{FC} = 26,2 - 27,7 \text{ мА}$.

Токи и напряжение в цепи измерителя УЗО изменяются в пределах $I_0 = 35,4 - 43,6 \text{ мА}$ и $U_0 = 154 - 201 \text{ В}$. При этом, ток в цепи измерителя в режиме однофазной утечки превышает ток срабатывания УЗО $I_{УЗО} = 25 \text{ мА}$ на всем диапазоне изменения активного сопротивления изоляции при любой емкости сети относительно земли.

Действующие значения напряжения в ветвях фильтра УЗО изменяются в пределах $U_{FA} = 86 - 187,5 \text{ В}$, $U_{FB} = 593 - 675 \text{ В}$, $U_{FC} = 522 - 675 \text{ В}$.

Коэффициент несимметрии фазных напряжений в ветвях фильтра УЗО k_{NU} с ростом емкости увеличивается от 0,7 до 0,87, т.е. возникает эффект, обратный несимметрии фазных напряжений изоляции сети относительно земли. Это обусловлено тем, что при снижении фазного напряжения относительно земли токи определяются неизменным активным сопротивлением ветвей фильтра присоединения. При этом наибольшая степень несимметрии напряжений возникает при высоких активных сопротивлениях изоляции контролируемой сети.

На рисунках 4.7 и 4.8 приведены характерные диаграммы гармонического состава тока и напряжения в ветвях фильтра УЗО в симметричном режиме и режиме однофазной утечки (фаза А) при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,05$ мкФ/фазу.

Анализ показал, что в симметричном режиме утечки через изоляцию в ветвях фильтра присоединения УЗО наиболее значимой является 3-я гармоническая составляющая с коэффициентами $K_{I(3)} = 5,03\%$ и $K_{U(3)} = 15,17\%$. На контролирующий уровень сопротивления оперативный сигнал постоянного тока в цепи измерителя УЗО также оказывает значительное влияние 3-я гармоника с суммарными коэффициентами гармонических составляющих $K_I = 359\%$ и $K_U = 786\%$ (относительно уровня постоянного тока).

В режиме однофазной утечки через изоляцию в ветвях фильтра присоединения УЗО также наиболее значимой является 3-я гармоническая составляющая с коэффициентами $K_{I(3)} = 7,82\%$ и $K_{U(3)} = 23,89\%$. В цепи измерителя УЗО протекает синусоидальный ток, на который оказывает значительное влияние 3-я гармоника с суммарными коэффициентами гармонических составляющих $K_I = 8,66\%$ и $K_U = 16,08\%$.

Работоспособность фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО промышленной частоты обеспечивается в плане отключения режима однофазной утечки тока в ПКЭС. Однако наличие гармонических составляющих напряжения в цепи измерителя и ветвях фильтра присоединения УЗО может отрицательно сказаться на работе электронной измерительной схемы, выпрямителя блока питания и блока управления компенсирующим дросселем из-за нарушения условия магнитной совместимости.

Для устранения данной проблемы необходимо модернизировать фильтр присоединения УЗО путем установки низкочастотных фильтров, настроенных на гашение 3-ей гармонической составляющей напряжения.

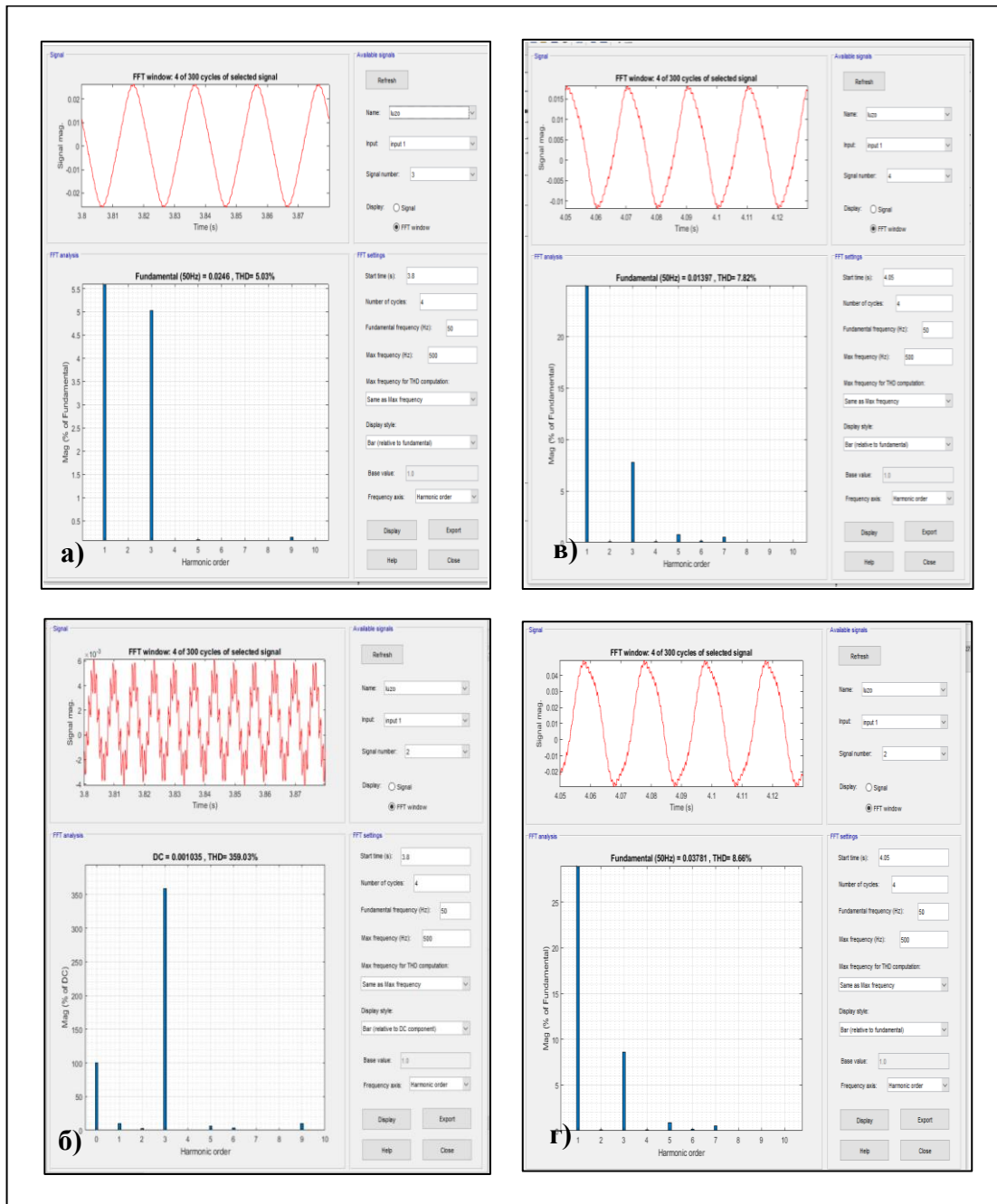


Рисунок 4.7 – Диаграммы токов в цепях фильтра УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,05$ мкФ/фазу: а, б) – ток в ветвях фильтра присоединения и в цепи измерителя в симметричном режиме утечки; в, г) – ток в ветви фильтра (фаза А) и в цепи измерителя в режиме однофазной утечки

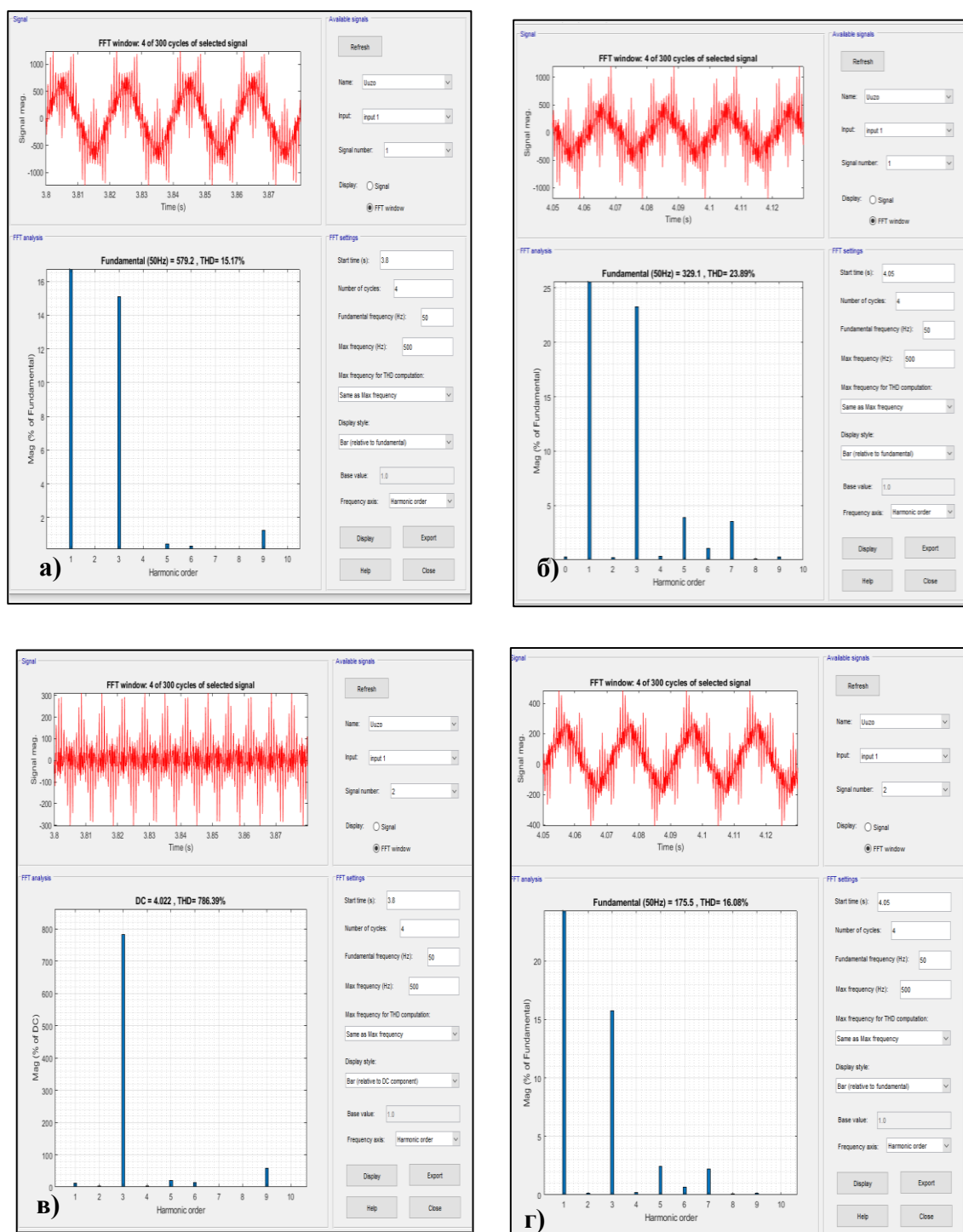


Рисунок 4.8 – Диаграммы напряжения в цепях фильтра УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,05$ мкФ/фазу: а, б) –напряжение в ветвях фильтра присоединения и в цепи измерителя в симметричном режиме утечки; в, г) – напряжение в ветви фильтра (фаза А) и в цепи измерителя в режиме однофазной утечки

Режимы симметричной и однофазной утечки тока через изоляцию

Рассматривалось два режима утечки тока в ПКЭС-1:

- режим симметричной утечки тока через изоляцию ($I_y^{(3)}$);
- режим однофазной утечки тока через фазу А ($I_y^{(1)}$).

Параметры изоляции сети относительно земли изменялись в пределах $R_I = 30 - 300$ кОм/фазу, $C_I = 0,05 - 1$ мкФ/фазу.

Исследовался режим однофазной утечки тока через фазу А на кабельном участке трансформатор – преобразователь частоты через сопротивление $R_y = 1$ кОм.

Определялись амплитудные и действующие значения токов и напряжений в цепях утечки тока через фазную изоляцию, токи и напряжения в ветвях фильтра и цепи измерителя УЗО, амплитудные токи и длительность переходных процессов в момент возникновения утечки и после срабатывания УЗО.

На рисунках 4.9 и 4.10 приведены характерные осциллограммы напряжений и токов в цепях утечки через изоляцию данного типа ПКЭС. Результаты измерений амплитудных и действующих значений токов и напряжений в цепях утечки через изоляцию приведены в приложении П1 (таблица П1.19).

Для заданных параметров ПКЭС-1 при изменении емкости в пределах $0,05 - 1$ мкФ/фазу действующее значение тока утечки в поврежденной фазе возрастает от 25 до 344 мА. Коэффициент несимметрии фазных напряжений k_{NU} сети относительно земли с ростом емкости снижается от 0,97 до 0,53. Мгновенное (амплитудное) значение начального тока утечки i_{max} увеличивается от 55 мА до 490 мА продолжительностью $t_{п.н.} = 0,01 - 0,05$ с.

Установившееся значение тока утечки в фазе А за время срабатывания УЗО составляет: $i_y = 25$ мА при $C_I = 0,05$ мкФ, $i_y = 47$ мА при $C_I = 0,15$ мкФ, $i_y = 75$ мА при $C_I = 0,25$ мкФ/фазу.

На рисунке 4.11 приведены осциллограмма и диаграммы спектра тока однофазной утечки через изоляцию и в цепи измерителя УЗО в случае повреждения фазы на участке ПЧ – КЛ – АД мощностью 24 кВт.

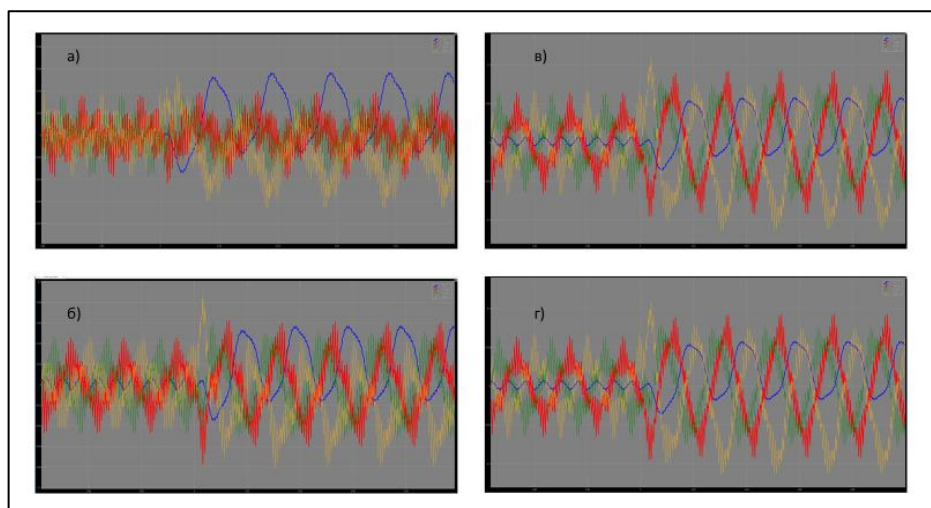


Рисунок 4.9— Осциллограммы фазных токов в режиме однофазной утечки тока в фазе А при $R_I = 180$ кОм/фазу: а) $C_I = 0,05$ мкФ, б) $C_I = 0,15$ мкФ, в) $C_I = 0,25$ мкФ, г) $C_I = 0,5$ мкФ

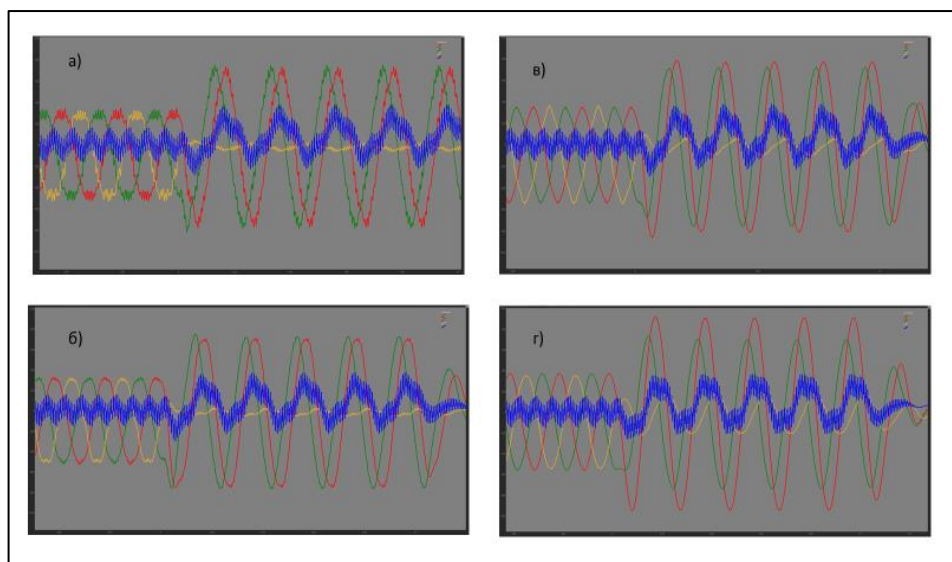


Рисунок 4.10 – Осциллограммы фазных напряжений в режиме однофазной утечки тока в фазе А при $R_I = 180$ кОм/фазу: а) $C_I = 0,05$ мкФ, б) $C_I = 0,15$ мкФ, в) $C_I = 0,25$ мкФ, г) $C_I = 0,5$ мкФ

После срабатывания УЗО напряжение и ток в фазах сети под действием режима генерирования обратной ЭДС отключаемых электродвигателей затухают по экспоненциальному закону за время $t_{\text{ост}} = 0,15 - 1,08$ с. Общее время утечки тока t_y в поврежденной фазе достигает $0,35 - 1,28$ с, что представляет потенциальную опасность для человека в случае прикосновения к токоведущим частям электрооборудования.

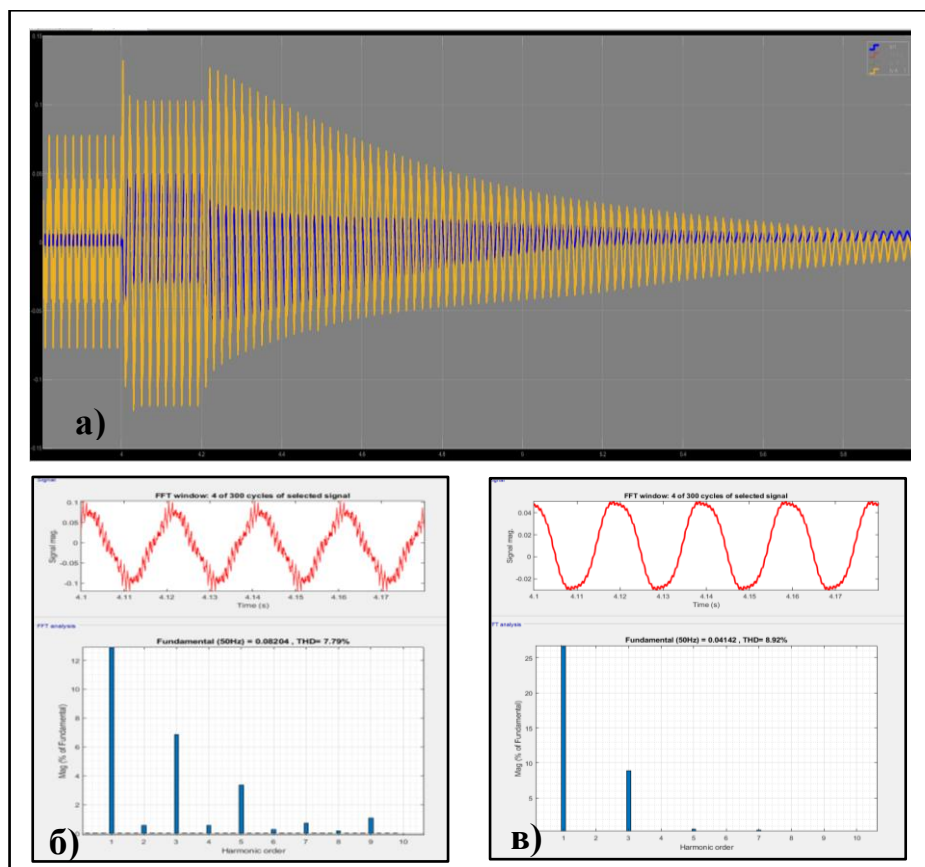


Рисунок 4.11 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока однофазной утечки через изоляцию (б) и в цепи измерителя УЗО (в)

Моделирование режимов утечки в ПКЭС-1 показали наличие существенного влияния высших гармонических составляющих на токи и напряжения в цепях утечки. Результаты измерений коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения и тока, а также суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока в цепях утечки через изоляцию приведены в Приложении П1 (таблицы П1.20 и П1.21).

Спектральный анализ показал, что в обоих режимах в токах утечки через изоляцию присутствуют гармоники с 3-ей по 9-ю (таблица 4.1). Основными источниками высших гармонических составляющих является преобразователь частоты и электродвигатель. При этом, наличие ФКУ, реакторов и синус-фильтров практически не оказывает влияния как на гармонический состав, так и на величину коэффициентов n -ых гармонических составляющих фазного напряжения сети относительно земли и токов утечки через изоляцию.

Характерные диаграммы токов и напряжений в цепях утечки через изоляцию при $R_I = 120$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу представлены на рисунке 4.12.

Таблица 4.1 – Гармонический состав тока и напряжения в цепи 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
4	1,1	0,3	2,2	2,2
5	27	5,45	10,5	10,5
6	13,6	2,3	0,8	0,8
7	11	1,6	3	2,6
8	1,5	0,2	0,6	0,5
9	7	0,8	2,9	2,7

Анализ показал, что наибольшее искажение вносят нечетные 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники.

На рисунках 4.13 и 4.14 приведены зависимости изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения при изменении параметров изоляции электрической сети в симметричном и однофазном режимах утечки тока через изоляцию.

Наибольшее искажение формы кривых токов и напряжений происходит при емкости изоляции $C_I = 0,05$ мкФ/фазу и $R_I = 300$ кОм/фазу.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих в режиме $I_y^{(3)}$ в зависимости от величины активного сопротивления фазы изменяются в пределах $K_I = 23 - 95\%$, $K_U = 10,6 - 15,8\%$.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих в режиме $I_y^{(1)}$ в зависимости от величины активного сопротивления фазы изменяются в пределах $K_I \approx K_U = 13,6 - 37,9\%$.

С увеличением емкости фазной изоляции от 0,05 до 0,5 мкФ/фазу происходит существенное снижение суммарных коэффициентов гармонических составляющих до величин $K_I = 1,81\%$, $K_U = 1,5\%$.

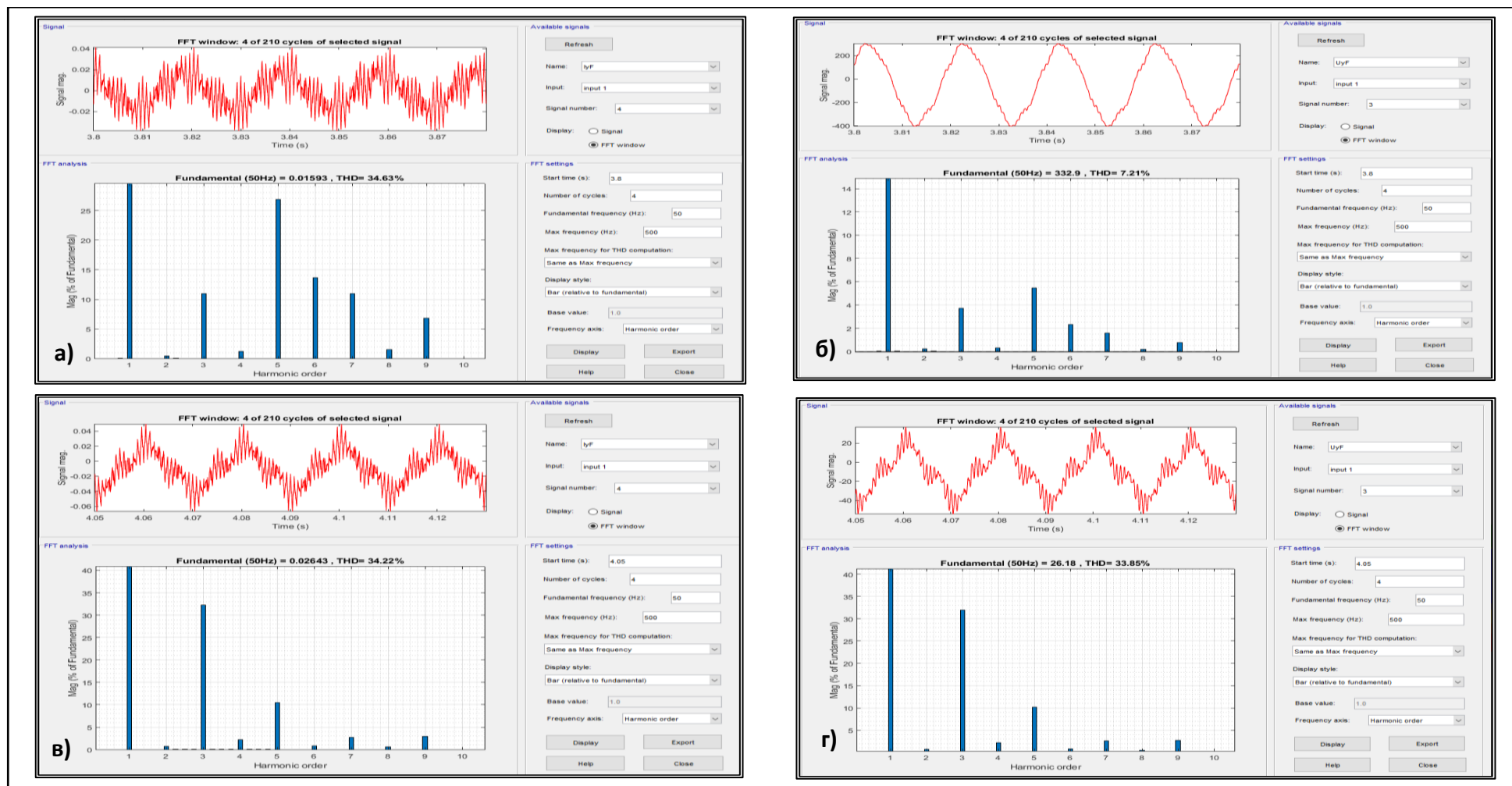


Рисунок 4.12 – Диаграммы токов и напряжений в цепях утечки через изоляцию при $R_I = 120$ кОм/фазу, $C_I = 0,15$ мкФ/фазу: а, б) – ток и напряжение в симметричном режиме утечки; в, г) – ток и напряжение в поврежденной фазе А (однофазная утечка)

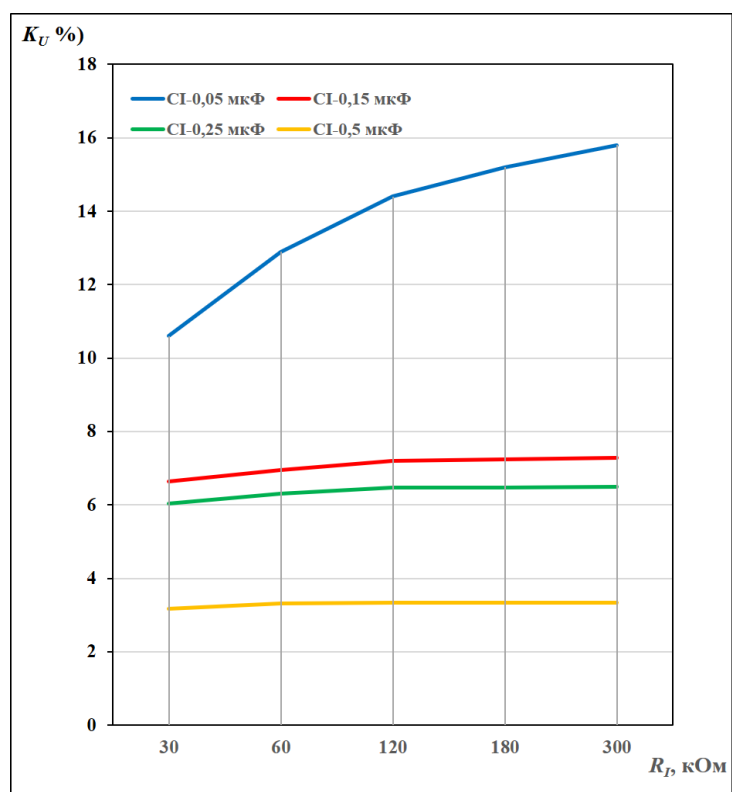


Рисунок 4.13 – Зависимости изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения сети относительно земли в симметричном режиме утечки тока

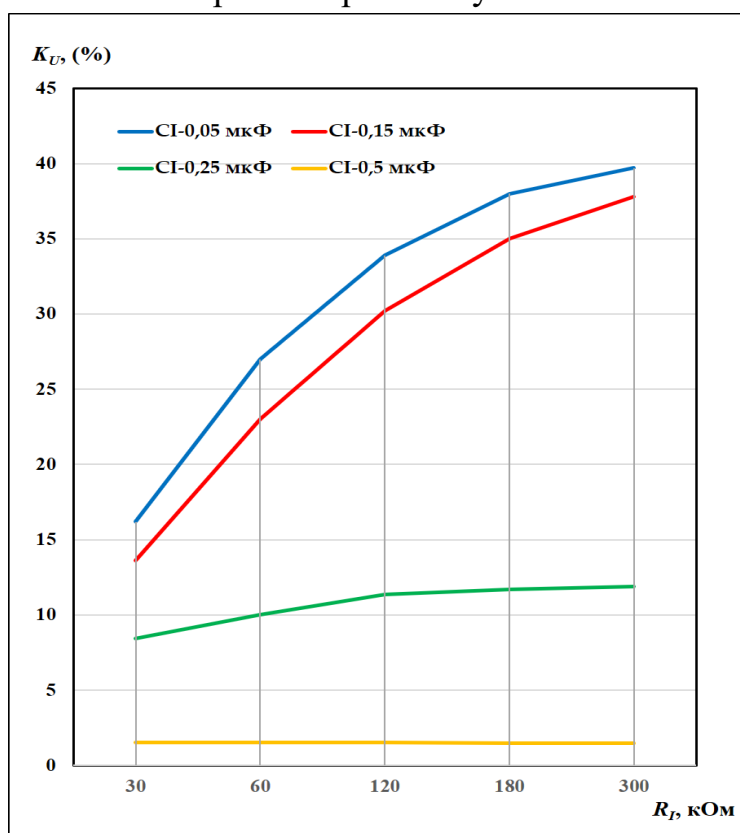


Рисунок 4.14 – Зависимости изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в режиме однофазной утечки тока

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что наличие наводимых в цепях утечки тока высших гармонических составляющих может привести к нарушению магнитной совместимости при работе блоков питания, измерительных и исполнительных элементов, а также блока управления компенсирующим дросселем УЗО и представлять потенциальную опасность для человека в случае прикосновения к токоведущим частям электрооборудования.

Критические режимы утечки тока через человека

В соответствии с поставленной задачей проведены исследования потенциальной опасности поражения человека электрическим током для двух критических случаев:

- 1) прикосновение произошло к токоведущей фазе в энергопоезде на участке до преобразователя частоты;
- 2) прикосновение произошло в цепи постоянного тока преобразователя частоты.

В обоих случаях УЗО теоретически контролирует всю комбинированную электрическую сеть. При этом оно подключено к сети после автоматического выключателя или встроено непосредственно в участковую подстанцию.

Рассмотрим случай прикосновения человека к токоведущей фазе в энергопоезде на участке до преобразователя частоты. Так как протяженность кабельных линий между аппаратами в составе энергопоезда не превышает 1 – 2 м, можем принять допущение, что активное сопротивление кабеля достаточно высокое (более 300 кОм/фазу), а емкость практически равна нулю.

Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении человека к фазе А на участке трансформатор – преобразователь частоты приведены в Приложении П1 (таблица П1.25).

Характерные осциллограмма и диаграммы спектра высших гармонических составляющих токов утечки и в цепи измерителя УЗО приведены на рисунке 4.15.

При изменении параметров изоляции кабельной линии на участке ПЧ - АД в диапазоне $R_I = 80 - 300$ кОм/фазу и емкости $C_I = 0,05 - 1$ мкФ/фазу максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 158 - 400$ мА.

Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания защитного отключения $t_{сз} = 0,2$ с составляет $I_{h1} = 63 - 184$ мА, что соответствует прохождению через человека количества электричества $Q_{h.сз} = 12,6 - 36$ мА·с.

После отключения трансформатора человек попадает под воздействие обратной ЭДС отключаемого электродвигателя. При этом, через нерегулируемый выпрямитель преобразователя частоты на участок, где произошло прикосновение, трансформируется напряжение постоянного тока с широким спектром гармонических составляющих.

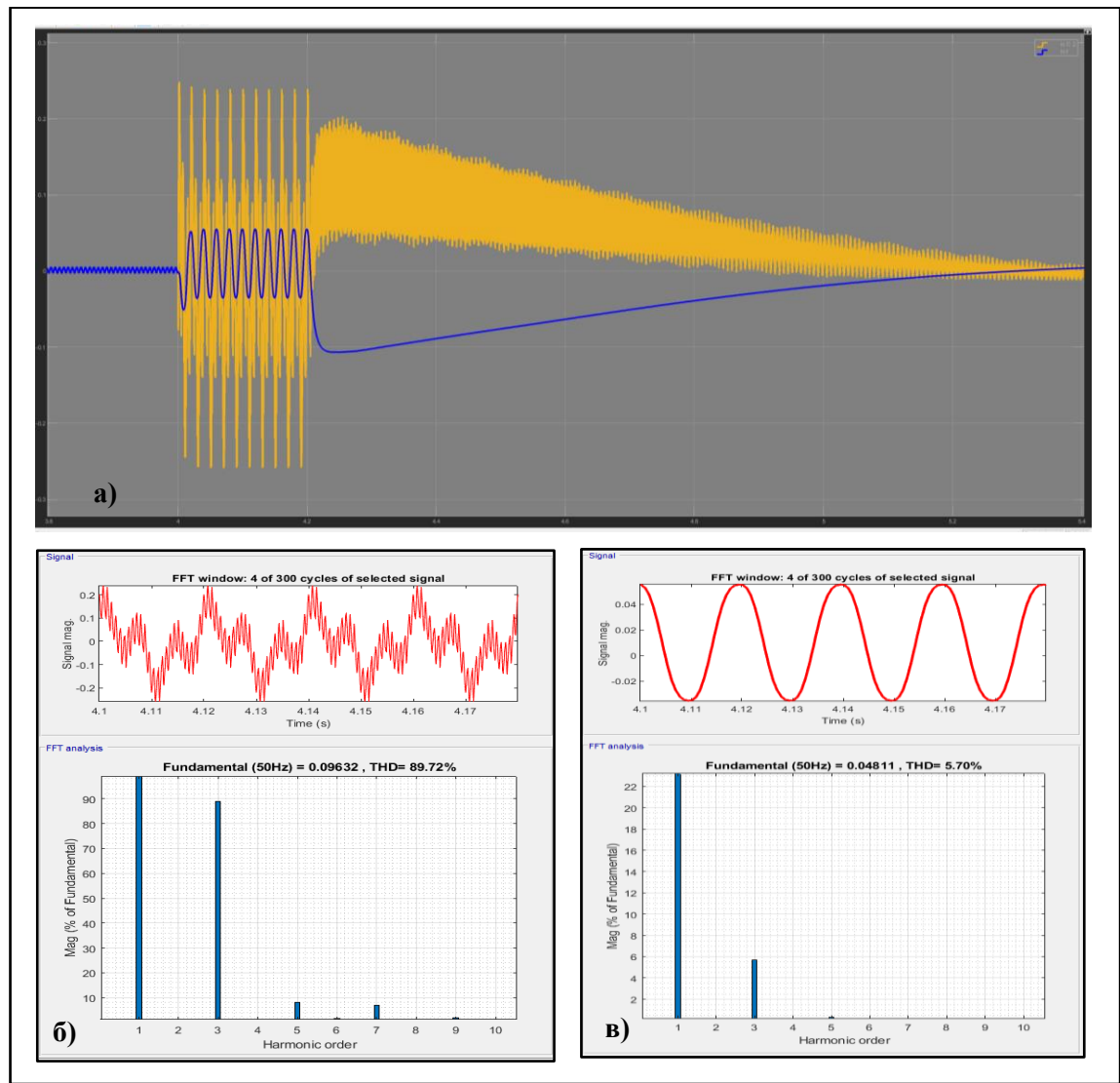


Рисунок 4.15 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока однофазной утечки через изоляцию (б) и в цепи измерителя УЗО (в)

Максимальное действующее значение тока $I_{h,max}$ изменяется в пределах от 58 до 184 мА. В качестве временного интервала принималось время снижения

тока до $I_{h.min} = 6$ мА, соответствующего безопасному при длительности воздействия более 1 с. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1,06 - 1,07$ с количество электричества при любой комбинации параметров изоляции составляет $Q_{h.эдс} = 64,1 - 71,2$ мА·с, что без учета $Q_{h.сз}$ превышает $Q_{доп} = 50$ мА·с.

На человека оказывает влияние целый спектр гармонических составляющих тока утечки. Наиболее значимыми являются 3-я, 5-я, 6-я, 7-я и 9-я гармоники. Коэффициент $K_{I(3)}$ многократно превышает свое значение 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 кардиоцикла.

Таким образом, можно сделать вывод, что серийные УЗО и высокое сопротивление изоляции в данном варианте ПКЭС не могут полностью обеспечить условия электробезопасности.

Рассмотрим случай прикосновения человека к полюсу в звене постоянного тока преобразователя частоты.

Величина тока утечки будет определяться напряжением выпрямленного тока и циркулировать в контуре через землю, УЗО и нерегулируемый выпрямитель. Как и в предыдущем случае циркуляция тока через сопротивления изоляции на участке трансформатор – преобразователь частоты практически отсутствует из-за их высокого значения (более 300 кОм/фазу).

На рисунке 4.16 приведены характерная осциллограмма и диаграммы спектра тока через человека, прикоснувшегося к полюсу звена постоянного тока преобразователя частоты, и в цепи измерителя УЗО.

При изменении параметров изоляции кабельной линии на участке ПЧ-АД в диапазоне $R_I = 80 - 300$ кОм/фазу и $C_I = 0,05 - 0,5$ мкФ/фазу максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 365$ мА. Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания защитного отключения $t_{сз} = 0,2$ с составляет $I_{h1} = 108$ мА, что соответствует прохождению через человека количества электричества $Q_{h.сз} = 21,6$ мА·с.

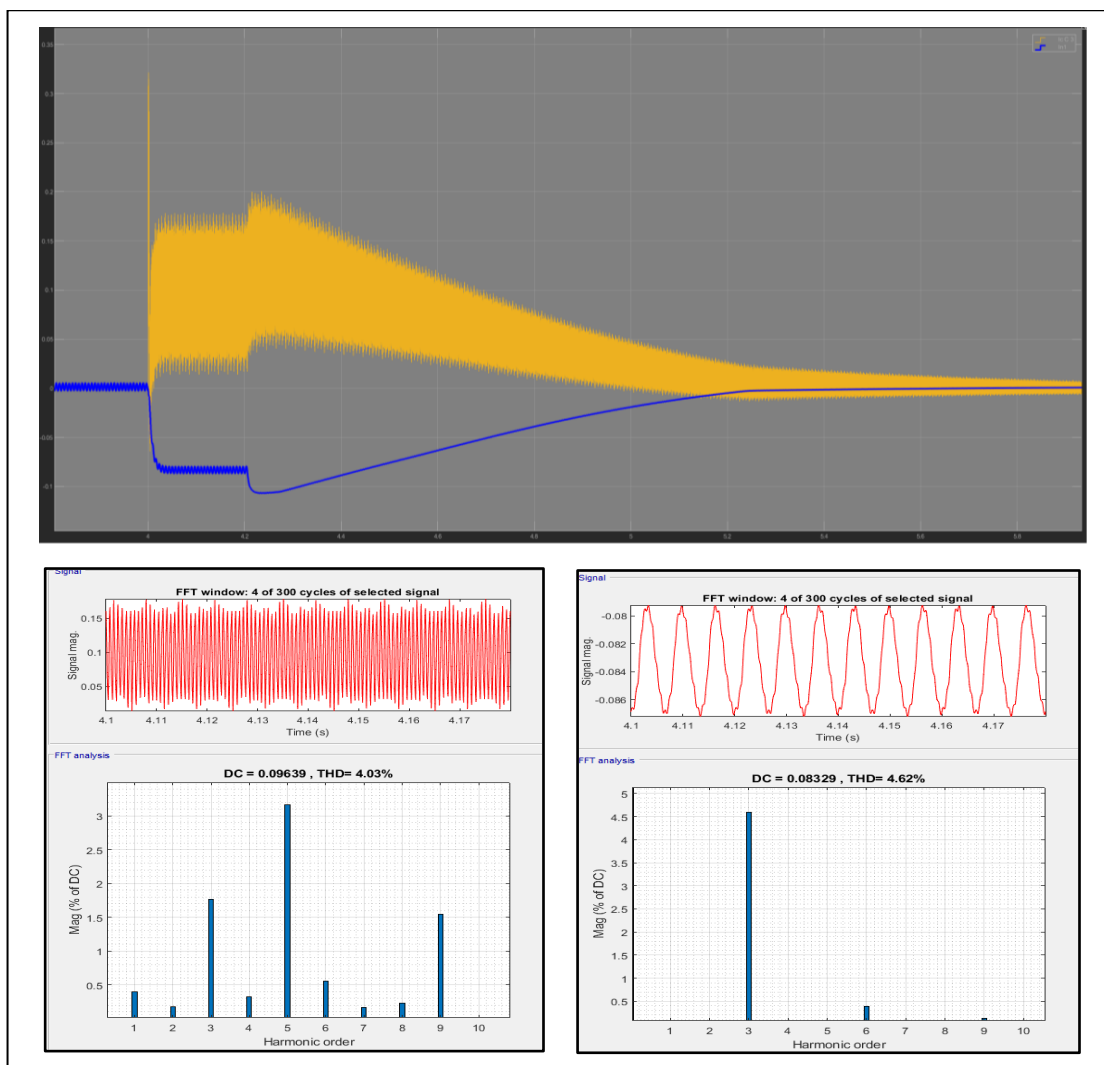


Рисунок 4.16 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока через человека (б), прикоснувшегося к полюсу звена постоянного тока и в цепи измерителя УЗО (в)

Максимальное действующее значение тока $I_{h.max} = 128,3$ мА. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1,5$ с количество электричества составляет $Q_{h.эдс} = 93 - 98$ мА·с, что превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

Коэффициенты $K_{I(n)}$ гармонических составляющих тока и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в процентном отношении к постоянной составляющей выпрямленного тока не превышают условно допустимых значений и практически не зависят от параметров изоляции трехфазной электрической сети.

На рисунке 4.17 приведены характерные осциллограммы и диаграммы спектра токов и напряжения в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя

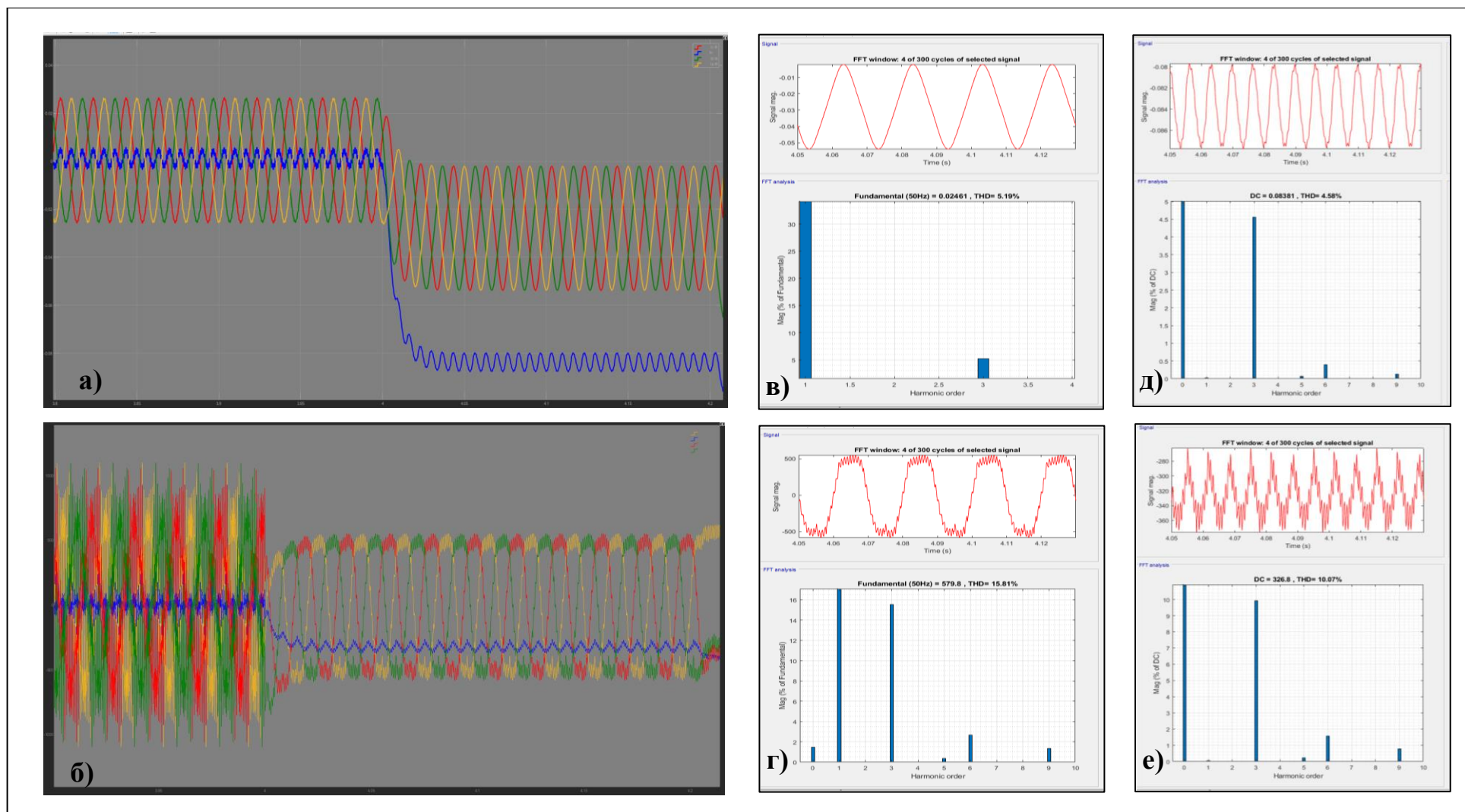


Рисунок 4.17– Характерные осциллограммы (а, б) и диаграммы (в, г) спектра токов и напряжения в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО (д, е) в режиме однополюсного включения человека в звене постоянного тока

УЗО в режиме однополюсного включения человека в звене постоянного тока выпрямителя ПЧ.

Отличительной особенностью данного режима является то, что при однополюсном прикосновении человека в ветвях фильтра УЗО напряжение и токи остаются симметричными, но увеличиваются по действующему значению соответственно с 5,5 до 37,2 мА и с 310 до 417 В. Ток и напряжение в цепи измерителя увеличиваются соответственно с 30 до 85 мА и с 116 до 328 В.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазного тока и напряжения в ветвях фильтра присоединения снижаются соответственно с 8,5 до 5,2% и с 40,6 до 16,2%.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения в цепи измерителя, в процентном отношении к составляющей постоянного тока и напряжения, соответственно снижаются с 8,7 до 4,5% и от 15,6 до 12%.

Наибольшее искажения вносит наличие третьей гармонической составляющей напряжения, которая достигает 15,8% для напряжения в ветвях фильтра УЗО и до 10,8% в цепи измерителя, что свидетельствует о необходимости компенсации этой гармоники.

Ток утечки через человека при прикосновении к полюсу в звене постоянного тока не зависит от состояния изоляции ПКЭС-1. Для асинхронных электродвигателей мощностью менее 45 кВт его потенциальную опасность можно ограничить по длительности воздействия за счет динамического торможения преобразователем частоты.

Компенсация емкостных токов утечки

Одной из задач данного раздела является анализ работы компенсатора емкостного тока утечки УЗО в подземной комбинированной электрической сети.

Наибольшая эффективность работы блока компенсации обеспечивается при его настройке на половину предельной емкости сети. Так как предельно допустимая емкость в соответствии с ГОСТ 31612-2012 [51] не превышает

1 мкФ/фазу, то компенсирующий дроссель в современных УЗО настраивается на 0,25 мкФ/фазу (при $C_I = 0,5$ мкФ/фазу) и 0,5 мкФ/фазу (при $C_I = 1$ мкФ/фазу).

На рисунке 4.18, в качестве примера, приведены осциллограммы токов в режиме однофазной утечки через изоляцию и диаграммы распределения их действующих значений в ПКЭС емкостью $C_I = 0,5$ мкФ/фазу при отключенном (рисунок 4.18, а, в) и при включенном компенсаторе емкостного тока утечки (рисунок 4.18, б, г).

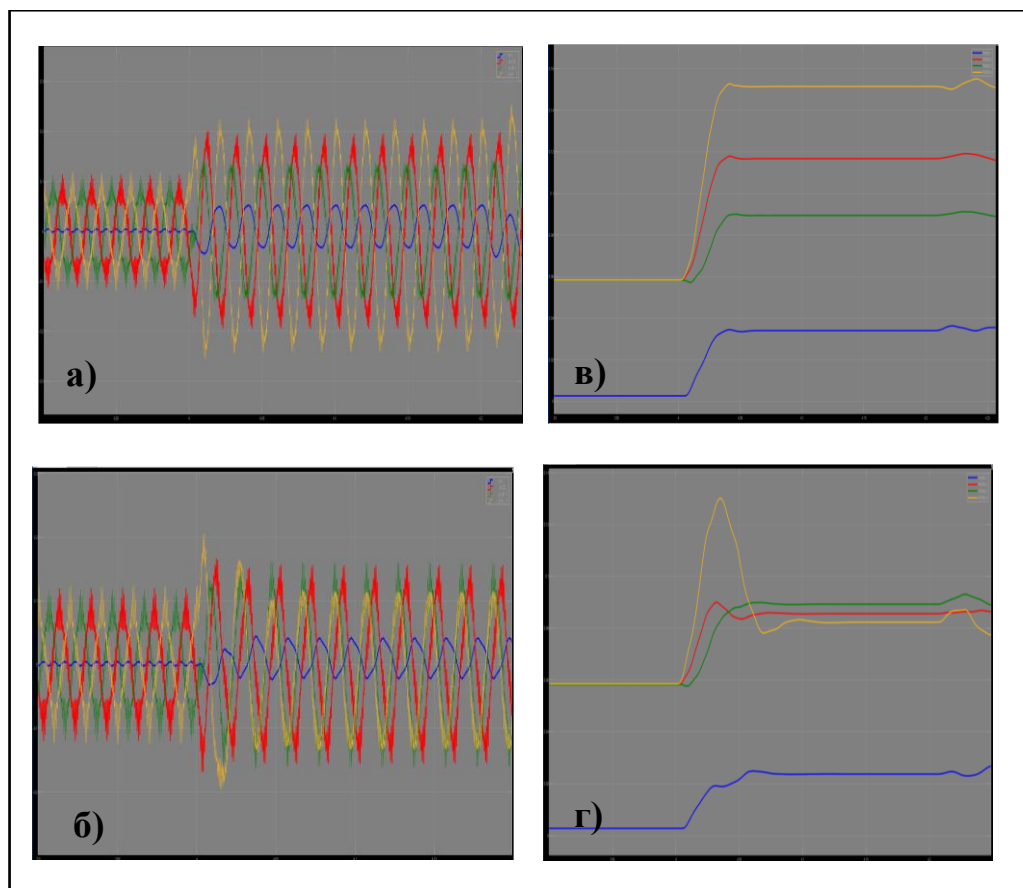


Рисунок 4.18 – Осциллограммы токов утечки через изоляцию и диаграммы их действующих значений при $C_I = 0,5$ мкФ/фазу: а, в) при отключенном компенсаторе, б, г) при включенном компенсаторе емкостного тока утечки

На рисунке 4.19 приведены соответствующие осциллограммы токов в ветвях фильтра УЗО в режиме однофазной утечки через изоляцию и диаграммы распределения их действующих значений в ПКЭС емкостью $C_I = 0,5$ мкФ/фазу при отключенном (рисунок 4.19, а, в) и при включенном компенсаторе емкостного тока утечки (рис. 4.19, б, г).

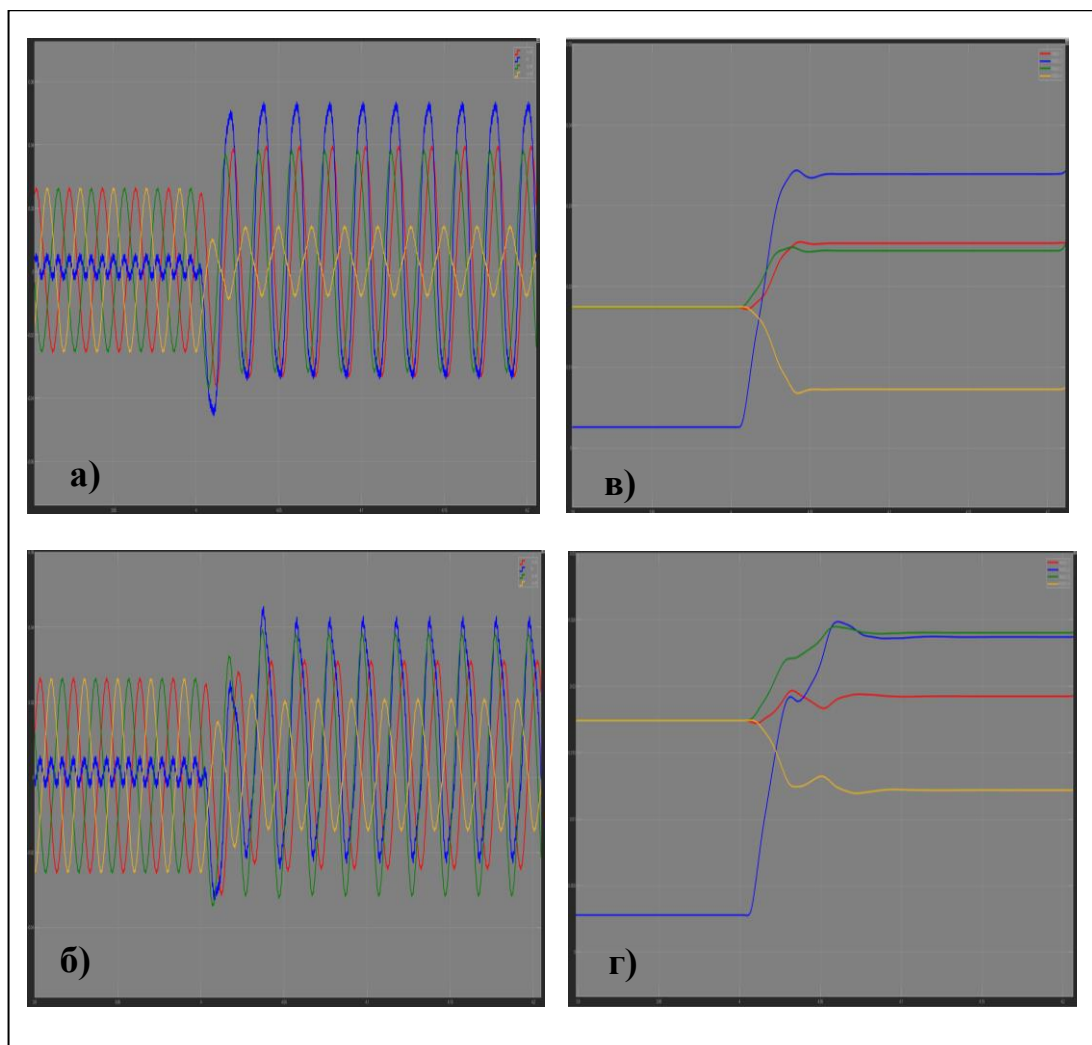


Рисунок 4.19 – Осциллограммы токов утечки в ветвях фильтра УЗО и диаграммы их действующих значений при $C_I = 0,5$ мкФ/фазу: а, в) при отключенном компенсаторе, б, г) при включенном компенсаторе емкостного тока утечки

В симметричном режиме утечки тока через изоляцию с емкостью 0,5 мкФ/фазу при отключенном компенсаторе токи в ветвях фильтра УЗО равны $I_{FA} = I_{FB} = I_{FC} = 17,5$ мА. Ток в цепи измерителя $I_N = 2,76$ мА.

В режиме однофазной утечки (фаза А) действующие значения токов в ветвях фильтра УЗО $I_{FA} = 7,57$ мА, $I_{FB} = 24$ мА, $I_{FC} = 25$ мА. Ток в цепи измерителя $I_N = 33,5$ мА.

В начальный момент утечки импульсное значение тока утечки через изоляцию фазы А достигает $i_{max} = 255$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,05$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы составляет $I_{yA} = 151$ мА.

В симметричном и однофазном режимах утечки тока через изоляцию с емкостью 0,5 мкФ / фазу при включенном компенсаторе токи в ветвях фильтра УЗО и в цепи измерителя остаются неизменными, как и при отключенном компенсаторе.

В начальный момент утечки импульсное значение тока фазы А снижается до $i_{max} = 200$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,07$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы снижается до $I_{yA} = 75,5$ мА.

Таким образом, процессе компенсации действующее значение тока однофазной утечки снижается в два раза (50,6%).

При настройке компенсирующего дросселя на емкость, равную емкости изоляции электрической сети эффективность компенсации снижается на 7%.

В симметричном и однофазном режимах утечки тока через изоляцию с емкостью 1 мкФ / фазу при отключенном компенсаторе токи в ветвях фильтра УЗО и в цепи измерителя, как и в предыдущих вариантах, не изменяются.

В начальный момент утечки импульсное значение тока фазы А достигает $i_{max} = 420$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,07$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы увеличивается до $I_{yA} = 340$ мА.

В симметричном и однофазном режимах утечки тока через изоляцию с емкостью 1 мкФ/фазу при включенном компенсаторе в начальный момент утечки импульсное значение тока фазы А снижается до $i_{max} = 200$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,07$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы снижается до $I_{yA} = 112,6$ мА.

Таким образом, процессе компенсации действующее значение тока однофазной утечки снижается на 67%.

В работе рассматривался вариант подключения компенсатора емкостного тока после преобразователя частоты на участке КЛ – АД. Исследования показали, что для данной конфигурации ПКЭС-1 такое подключение не целесообразно, т.к.

не влияет на степень компенсации емкостного тока утечки и усложняет техническую реализацию такого способа.

Существующий принцип компенсации, реализованный в современных серийных УЗО, не обеспечивает полную компенсацию емкостного тока в однофазном режиме утечки. Одним из решений данной проблемы является применение устройства пофазной компенсации емкостного тока утечки, разработанного в данной диссертационной работе.

4.3. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания очистного комбайна

Исследование режимов утечки тока осуществлялась на имитационной модели комбинированной подземной электрической сети напряжением $U_L = 660$ В с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО, в случае, когда участок от трансформатора до преобразователя имеет протяженность до 600 м (рисунок 4.20). Преобразователь и электродвигатель механизма подачи представляют собой условно единый блок, устанавливаемый непосредственно на очистном комбайне или на выносной системе подачи, т.е. участок кабеля после ПЧ имеет малую протяженность ($L_k < 5$ м), высокое активное сопротивление ($R_l > 300$ кОм/фазу) и очень маленькую емкость ($C_l < 0,01$ мкФ/фазу) электрической сети относительно земли.

Со стороны силового трансформатора установлены токоограничивающие реакторы и два фильтрокомпенсирующих устройства (ФКУ), параметры которых рассчитаны на 5-ю и 7-ю гармоники.

Результаты имитационного моделирования приведены в Приложении П1 (таблицы П1.26 – П1.28).

Рассмотрим режимы трехфазной и однофазной утечки тока в случае, если в силовой сети на участке ТР – ПЧ присутствуют сетевые реакторы и ФКУ. Между ПЧ и АД включен синус-фильтр. Компенсатор УЗО отключен. Параметры изоляции изменяются в пределах $R_l = 10,5 - 300$ кОм/фазу, $C_l = 0,05 - 1$ мкФ/фазу. Однофазная утечка тока через человека моделируется при $R_h = 1$ кОм.

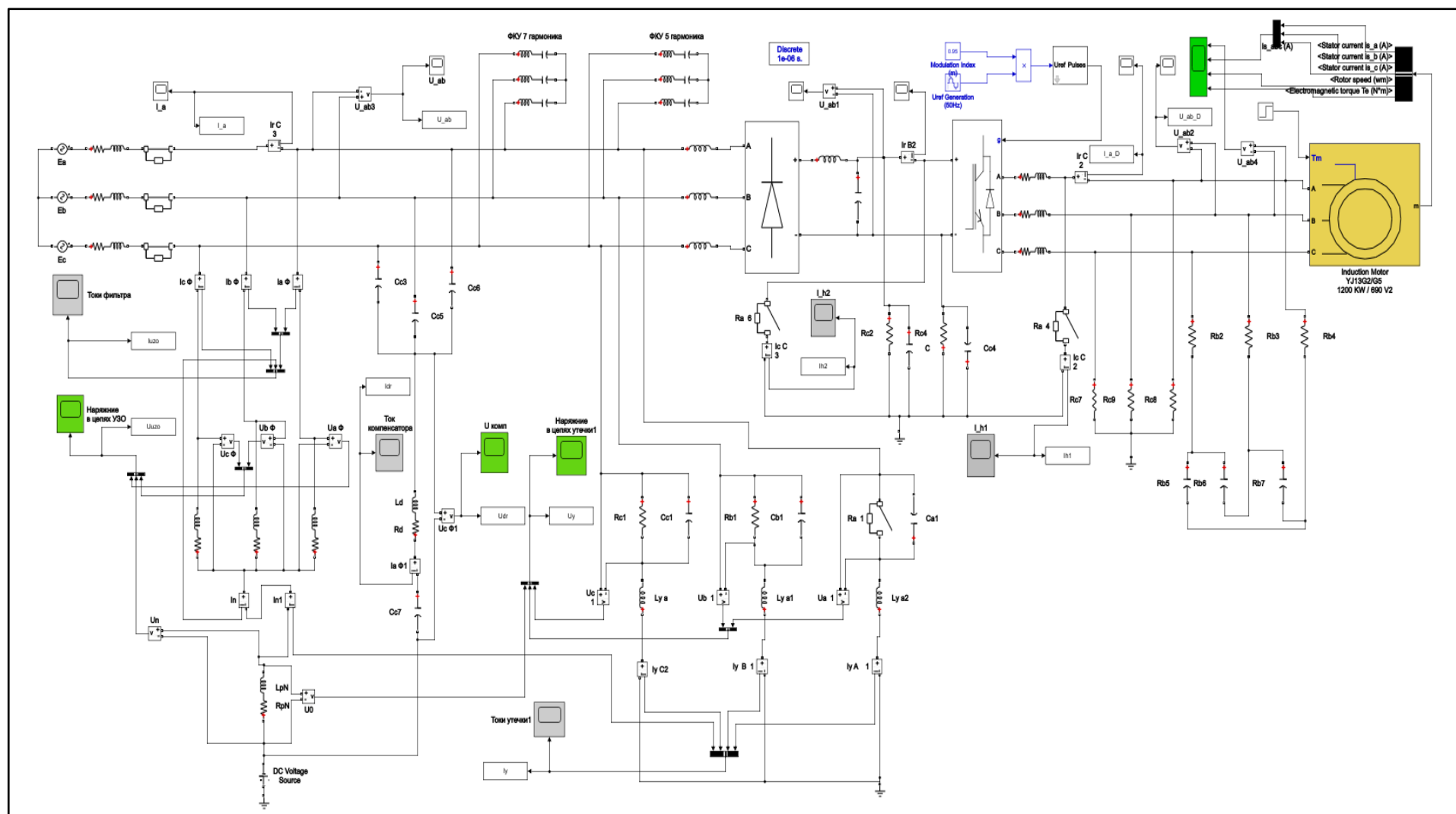


Рисунок 4.20 – Модель подземной электрической сети с единым блоком ПЧ-АД, УЗО с LR -фильтром и компенсатором емкостного тока утечки

Характерные осциллограммы фазных токов утечки и напряжений сети относительно земли, а также токов и напряжений в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО, при активном сопротивлении изоляции $R_I = 180 \text{ кОм/фазу}$ и емкости $C_I = 0,05 \text{ мкФ/фазу}$, приведены на рисунке 4.21.

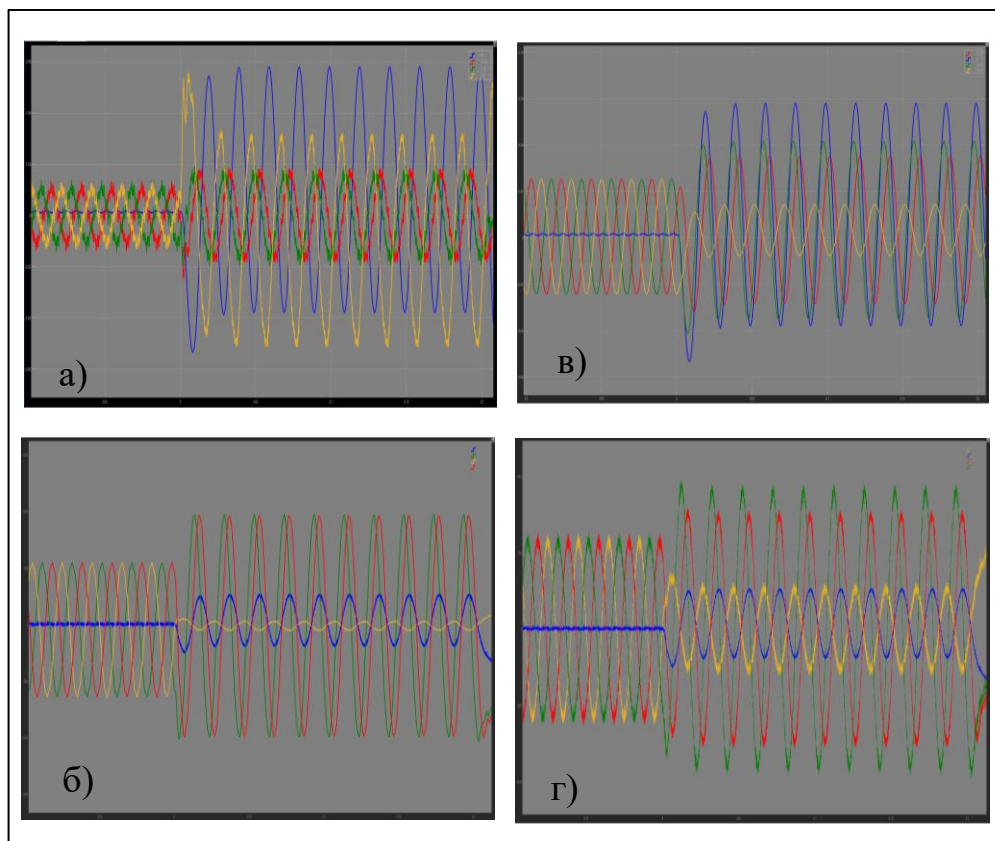


Рисунок 4.21 – Осциллограммы фазных токов утечки (а) и напряжений (б) сети относительно земли; токов (в) и напряжений (г) в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО

Характерные диаграммы спектра фазных токов утечки и напряжений сети относительно земли, а также токов и напряжений в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО приведены на рисунке 4.22.

В режиме трехфазной утечки тока через изоляцию высшие гармоники являются незначительными и изменяются с суммарными коэффициентами гармонических составляющих $K_I = 0,24 - 6,58 \%$ и $K_U = 0,08 - 2,29 \%$. При этом наибольшее искажение формы тока и напряжения происходит при емкости изоляции сети менее $0,15 \text{ мкФ/фазу}$.

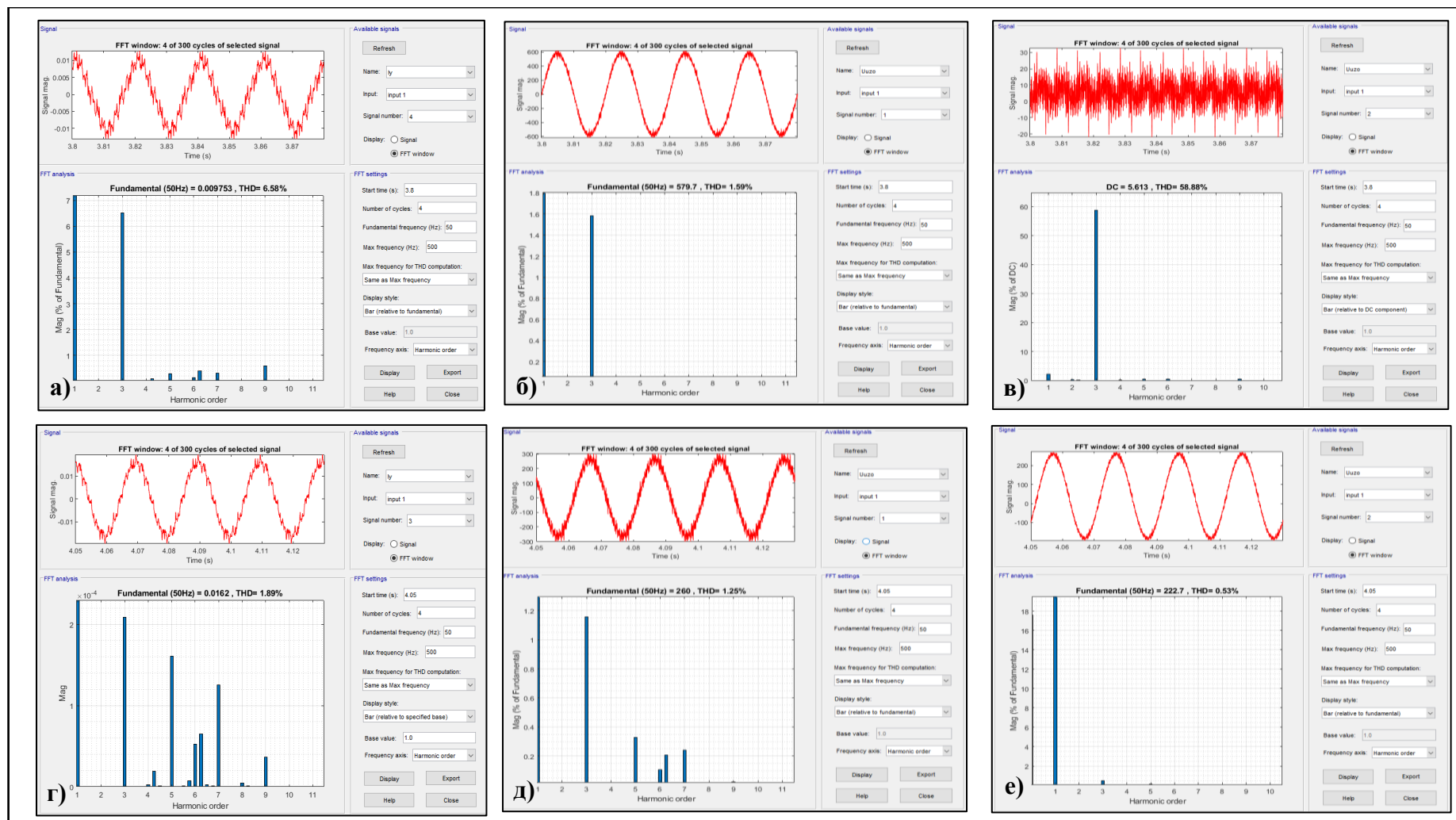


Рисунок 4.22 – Диаграммы спектра фазных токов утечки и напряжений: *симметричный режим – а) ток через изоляцию фазы, б) напряжение в ветвях фильтра, в) напряжение в цепи измерителя УЗО; однофазная утечка – г) ток через изоляцию фазы, д) напряжение в ветвях фильтра, е) напряжение в цепи измерителя УЗО*

В токе цепи измерителя присутствуют 3-я, 5-я, 6-я и 9-я гармоники. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих по отношению к выпрямленному току составляют $K_I = 0,46 - 27,9 \%$ и $K_U = 1,29 - 58,8 \%$. Наибольшее искажение в форму тока и напряжения вносит наличие третьей гармоники при емкости изоляции менее $0,15 \text{ мкФ/фазу}$.

В режиме однофазной утечки тока суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения в цепи измерителя УЗО изменяются в пределах $K_I = 0 - 0,28 \%$ и $K_U = 0 - 0,53 \%$.

Действующие значения токов в ветвях присоединения фильтра УЗО изменяются в диапазоне $I_{FA} = 8,5 - 10 \text{ мА}$, $I_{FB} = 22,5 - 30,9 \text{ мА}$, $I_{FC} = 35,1 - 42,5 \text{ мА}$. Фазные напряжения в ветвях фильтра присоединения УЗО составляют – $U_{FA} = 97,5 - 241 \text{ В}$, $U_{FB} = 500 - 640 \text{ В}$, $U_{FC} = 530 - 720 \text{ В}$. Действующие значения тока и напряжения в цепи измерителя УЗО изменяются соответственно в диапазоне $I_0 = 35,1 - 42,5 \text{ мА}$ и $U_0 = 162 - 200 \text{ В}$, что свидетельствует о работоспособности устройства защиты при действующей уставке на ток срабатывания $I_{сз} = 25 \text{ мА}$.

Коэффициент несимметрии фазных напряжений в ветвях фильтра УЗО изменяется в пределах $K_{NFU} = 0,65 - 0,85$.

Таким образом, можно сделать вывод, что для данной конфигурации сети влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока в симметричном и однофазном режимах утечки на эффективность работы УЗО оказывает наличие третьей гармонической составляющей напряжения в цепи измерителя при емкостях менее $0,15 \text{ мкФ/фазу}$. При значениях емкости изоляции более $0,15 \text{ мкФ/фазу}$ воздействие высших гармонических составляющих можно считать минимальным и не оказывающим влияние на эффективность работы УЗО.

В режиме однофазной утечки тока в цепях изоляции высшие гармонические составляющие практически не оказывают влияния на форму тока и напряжения. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения изменяются в пределах $K_I = 0,06 - 1,89 \%$ и $K_U = 0,05 - 4,95 \%$.

Фазные напряжения изоляции сети относительно земли составляют – $U_A = 30 - 406 \text{ В}$, $U_B = 575 - 710 \text{ В}$, $U_C = 690 - 1100 \text{ В}$. Коэффициент несимметрии

фазных напряжений сети относительно земли с ростом емкости изоляции уменьшается в пределах $K_{NU} = 0,96 - 0,63 \%$.

При изменении емкости изоляции сети относительно земли в диапазоне от $C_I = 0,05 - 1$ мкФ/фазу амплитудное значение тока утечки в поврежденной фазе увеличивается с 55 мА до 600 мА. Действующие значения токов утечки изменяются в диапазоне $I_A = 30 - 428$ мА, что соответствует прохождению через человека количества электричества, равное $Q_{h.сз} = 6 - 85,6$ мА·с.

Характерные осциллограмма и диаграммы высших гармонических составляющих токов однофазной утечки и в цепи измерителя УЗО приведены на рисунке 4.23.

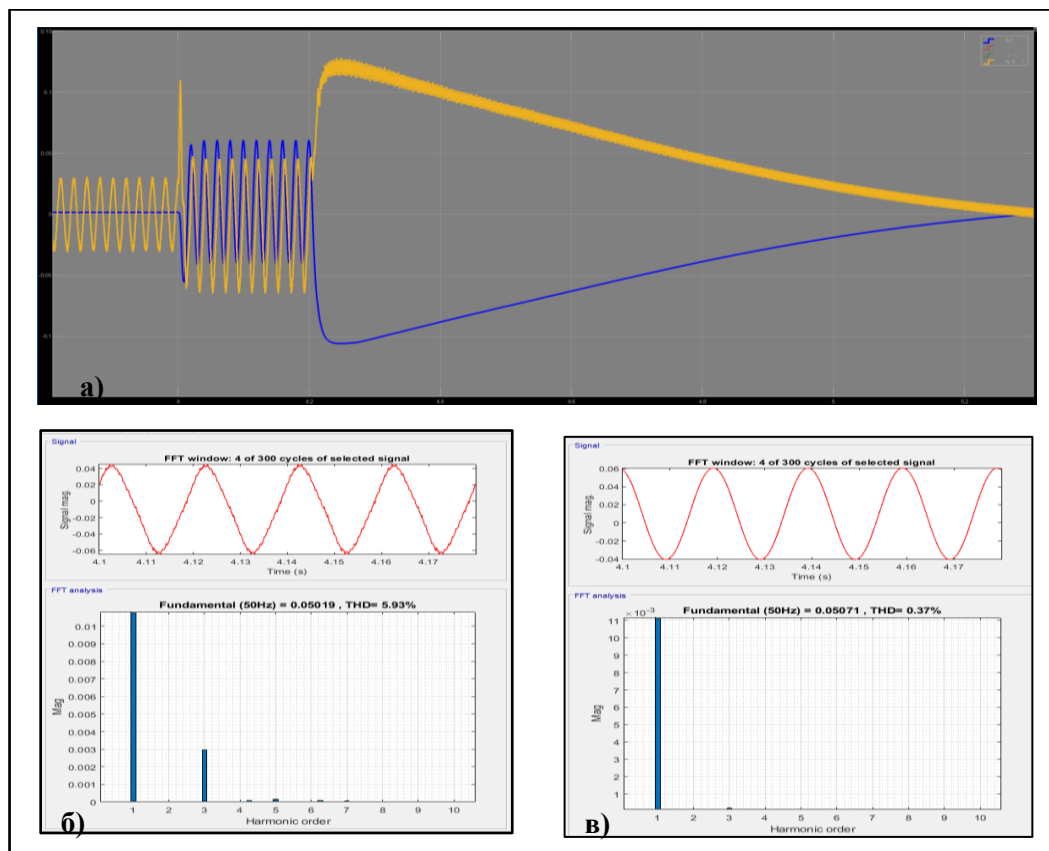


Рисунок 4.23 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока однофазной утечки через изоляцию (б) и в цепи измерителя УЗО (в)

После отключения трансформатора человек попадает под воздействие обратной ЭДС отключаемого электродвигателя. При этом, через нерегулируемый выпрямитель преобразователя частоты на участок, где произошло прикосновение,

трансформируется напряжение постоянного тока с широким спектром гармонических составляющих.

Максимальное действующее значение тока после отключения автоматического выключателя практически не изменяется $I_{h.max} = 120$ мА. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1,04 - 1,1$ с количество электричества при любой комбинации параметров изоляции составляет $Q_{h.эдс} = 62,4 - 66$ мА·с, что превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

На человека также оказывает влияние целый спектр гармонических составляющих тока утечки. Наиболее значимыми являются 3-я, 5-я, 6-я, 7-я и 9-я гармоники.

Критические режимы утечки тока через человека

Проведены исследования потенциальной опасности поражения человека электрическим током в ПКЭС-2 для двух случаев:

- 1) Прикосновение произошло к токоведущей фазе на участке между преобразователем частоты и асинхронным электродвигателем;
- 2) Прикосновение произошло в цепи постоянного тока преобразователя частоты.

В обоих случаях УЗО (также, как и в п. 4.2) теоретически контролирует всю комбинированную электрическую сеть.

Рассмотрим случай прикосновения человека к токоведущей фазе на участке ПЧ – АД. Такой вариант возможен, так как ПЧ и АД не находятся в едином взрывозащищенном корпусе и в местах крепления кабеля возможна утечка тока. Протяженность кабельных соединений между аппаратами не превышает 1 м, поэтому принято допущение, что активное сопротивление кабеля достаточно высокое (более 300 кОм/фазу), а емкость практически равна нулю.

Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении к фазе А на участке трансформатор – преобразователь частоты приведены в Приложении П1 (таблица П1.29).

Характерные осциллограммы и диаграммы спектра тока через человека и в цепи измерителя УЗО приведены на рисунке 4.24.

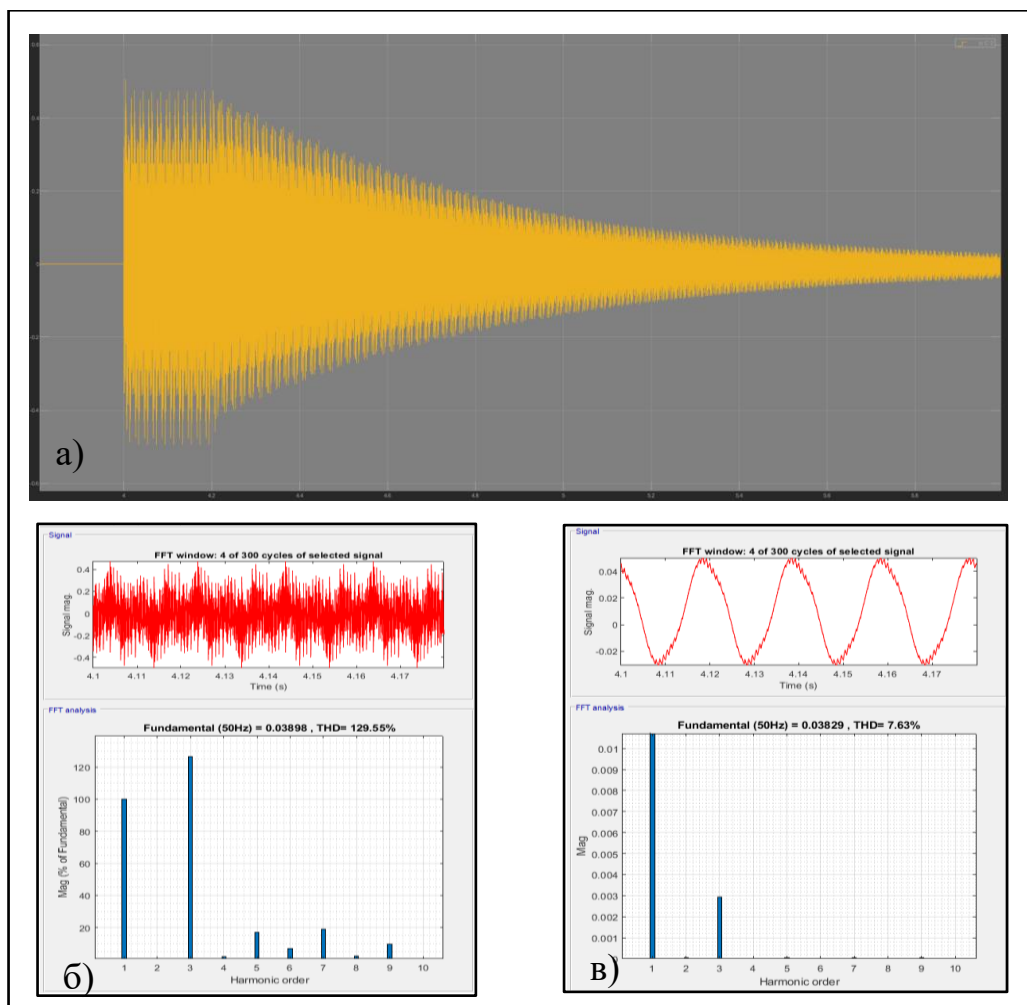


Рисунок 4.24 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока однофазной утечки на участке ПЧ - АД (б) и в цепи измерителя УЗО (в)

При изменении параметров изоляции кабельной линии на участке ТР – ПЧ диапазоне $R_I = 80 - 300$ кОм/фазу и емкости $C_I = 0,05 - 1$ мкФ/фазу максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 440 - 725$ мА. Действующее значение установившегося тока утечки за время $t_{сз} = 0,2$ с составляет $I_{h1} = 123 - 267,7$ мА, что соответствует прохождению через человека количества электричества, равного $Q_{h.сз} = 24,6 - 53,4$ мА·с.

После отключения трансформатора человек попадает под воздействие обратной ЭДС отключаемого электродвигателя.

Максимальное действующее значение тока $I_{h,max}$ после отключения автоматического выключателя изменяется в пределах от 123,2 до 250 мА. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 2,8$ с количество электричества при

любой комбинации параметров изоляции составляет $Q_{h.эдс} = 173,6 - 350 \text{ мА} \cdot \text{с}$, что даже без учета $Q_{h.сз}$ многократно превышает допустимое значение $Q_{\text{доп}} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

При настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью $0,5 \text{ мкФ/фазу}$ действующее значение тока утечки I_{h1} снижается с $185,5$ до 152 мА (18%).

При настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью 1 мкФ/фазу действующее значение тока утечки I_{h1} снижается с $267,7$ до 170 мА (36%).

Таким образом, можно сделать вывод, что компенсация емкостного тока утечки и высокое сопротивление изоляции данного типа ПКЭС не могут полностью обеспечить эффективность функционирования серийных УЗО. Есть вероятность попадания человека под наиболее длительное опасное воздействие модулированного напряжения после преобразователя частоты и обратной ЭДС электродвигателя после срабатывания УЗО.

Рассмотрим случай прикосновения человека к полюсу в звене постоянного тока преобразователя частоты.

Величина тока утечки будет определяться напряжением выпрямленного тока и циркулировать в контуре через землю, УЗО и нерегулируемый выпрямитель. Как и в предыдущем случае циркуляция тока через изоляцию на участке ТР – ПЧ практически отсутствует из-за их высокого значения.

Результаты расчетов приведены в Приложении П1 (таблица П1.30).

На рисунке 4.25 приведены характерная осциллограмма и диаграммы спектра тока через человека, прикоснувшегося к полюсу звена постоянного тока цепи выпрямителя, и в цепи измерителя УЗО.

При изменении параметров изоляции кабельной линии на участке ПЧ – АД в диапазоне емкости $C_l = 0,05 - 0,5 \text{ мкФ/фазу}$ ($R_l = 300 \text{ кОм/фазу}$) максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{\text{max}} = 335 \text{ мА}$. Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания защитного отключения $t_{сз} = 0,2 \text{ с}$ составляет $I_{h1} = 120 \text{ мА}$, что соответствует прохождению через человека количества электричества, равное $Q_{h.сз} = 24 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

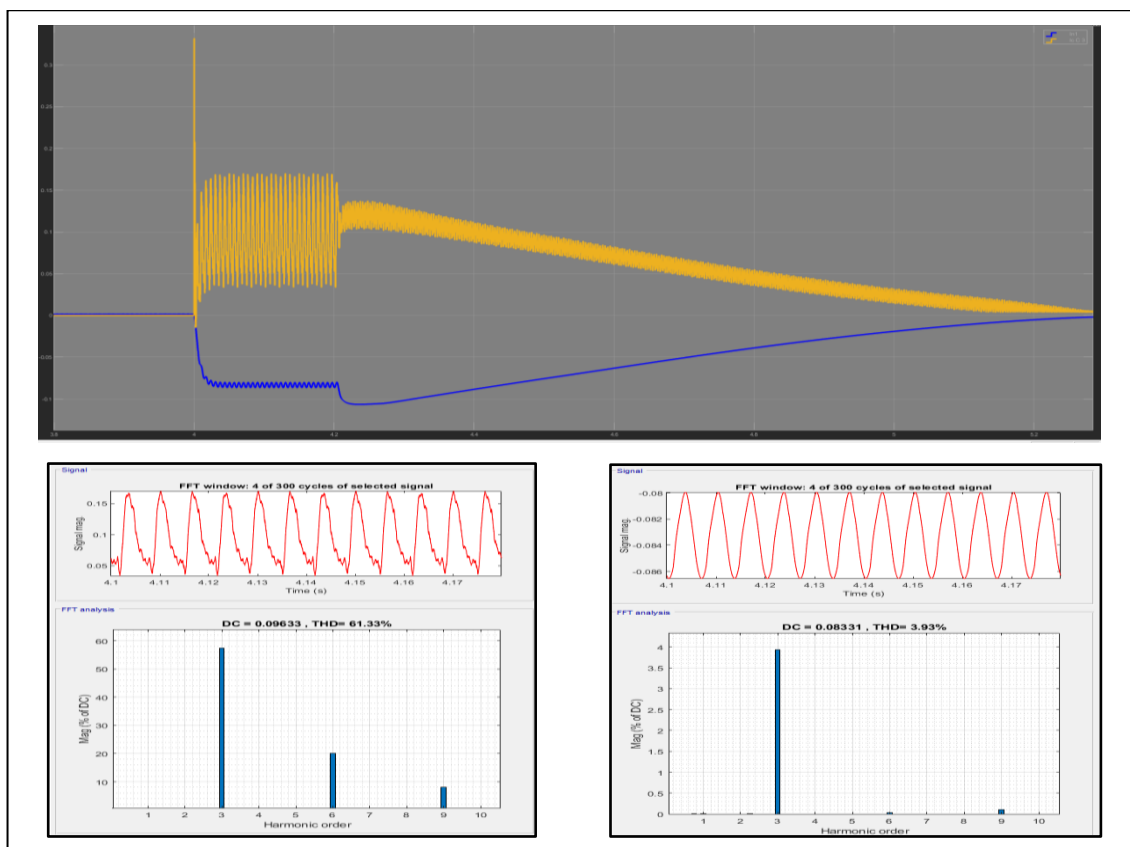


Рисунок 4.25 – Осциллограмма (а) и диаграммы спектра тока через человека, прикоснувшегося к полюсу цепи выпрямителя (б), и в цепи измерителя УЗО (в)

Максимальное действующее значение тока через человека $I_{h,max} = 135$ мА. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1,07$ с количество электричества через человека составляет $Q_{h,эдс} = 64,2 - 71,6$ мА·с, что даже без учета $Q_{h,сз}$ превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

Коэффициенты $K_{I(n)}$ гармонических составляющих тока и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения практически не зависят от параметров изоляции трехфазной электрической сети.

На рисунке 4.26 приведены характерные осциллограммы и диаграммы спектра токов и напряжения в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО в режиме однополюсного включения человека в звене постоянного тока выпрямителя преобразователя частоты.

Отличительной особенностью данного режима от предыдущего является то, что при однополюсном прикосновении человека в ветвях фильтра присоединения УЗО напряжение и токи остаются симметричными, но увеличиваются по

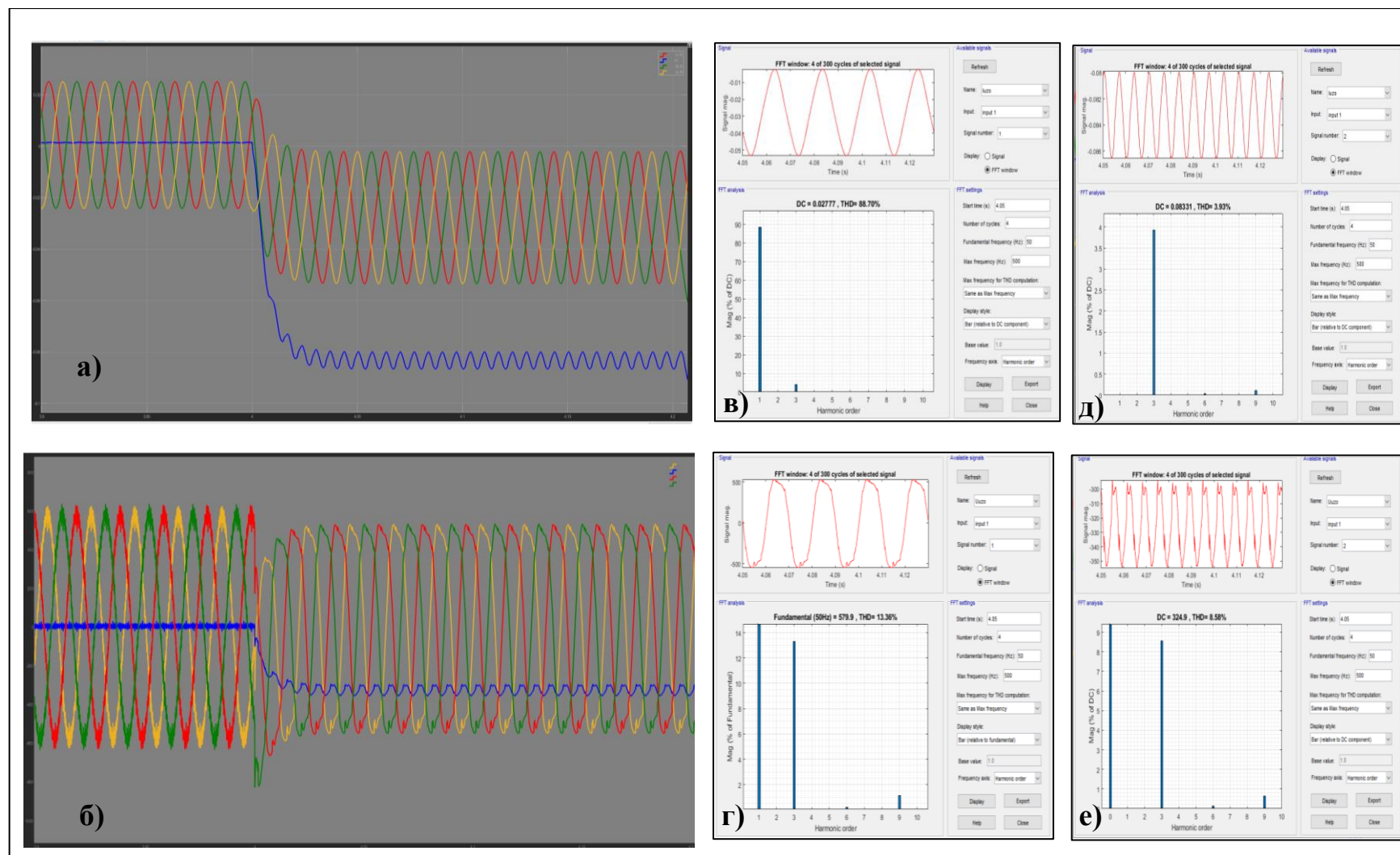


Рисунок 4.26 – Характерные осциллограммы (а, б) и диаграммы спектра токов (в, г) и напряжения (д, е) в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО в режиме однополюсного включения человека в звене постоянного тока

действующему значению соответственно с 17,4 до 32,7 мА и с 400 до 460 В. Ток и напряжение в цепи измерителя увеличиваются соответственно с 15 до 83,5 мА и с 150 до 325 В.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазного тока и напряжения в ветвях фильтра присоединения снижаются соответственно с 0,13 до 4,4% и с 0,39 до 13,4%.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения в цепи измерителя, в процентном отношении к составляющей постоянного тока и напряжения, соответственно снижаются с 10,7 до 4,8% и от 11,6 до 9,8%.

Наибольшее искажения вносит наличие третьей гармонической составляющей напряжения, которая достигает 108% для напряжения в ветвях фильтра УЗО и до 9% в цепи измерителя, что свидетельствует о необходимости компенсации этой гармоники.

Рассмотрим эффективность работы компенсатора емкостного тока при возникновении однофазной утечки на участке между трансформатором и преобразователем частоты.

Выполненный выше анализ показал, что в случае прикосновения человека к токоведущей фазе на участке преобразователь частоты – электродвигатель компенсатор УЗО компенсирует емкостной ток не более чем на 36%, а при однополюсном прикосновении в звене постоянного тока эффект компенсации равен нулю.

Результаты исследования приведены в приложении П1 (таблица П1.31).

На рисунке 4.27, в качестве примера, приведены осциллограммы токов нулевой последовательности и однофазной утечки через изоляцию, а также диаграммы распределения их действующих значений в подземной комбинированной сети емкостью $C_I = 1$ мкФ/фазу при отключенном (рисунок 4.27, а, б) и при включенном компенсаторе емкостного тока утечки (рисунок 4.27, в, г).

В начальный момент утечки импульсное значение тока поврежденной фазы А достигает i_{max} 650 мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,05$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы составляет $I_{yA} = 427$ мА.

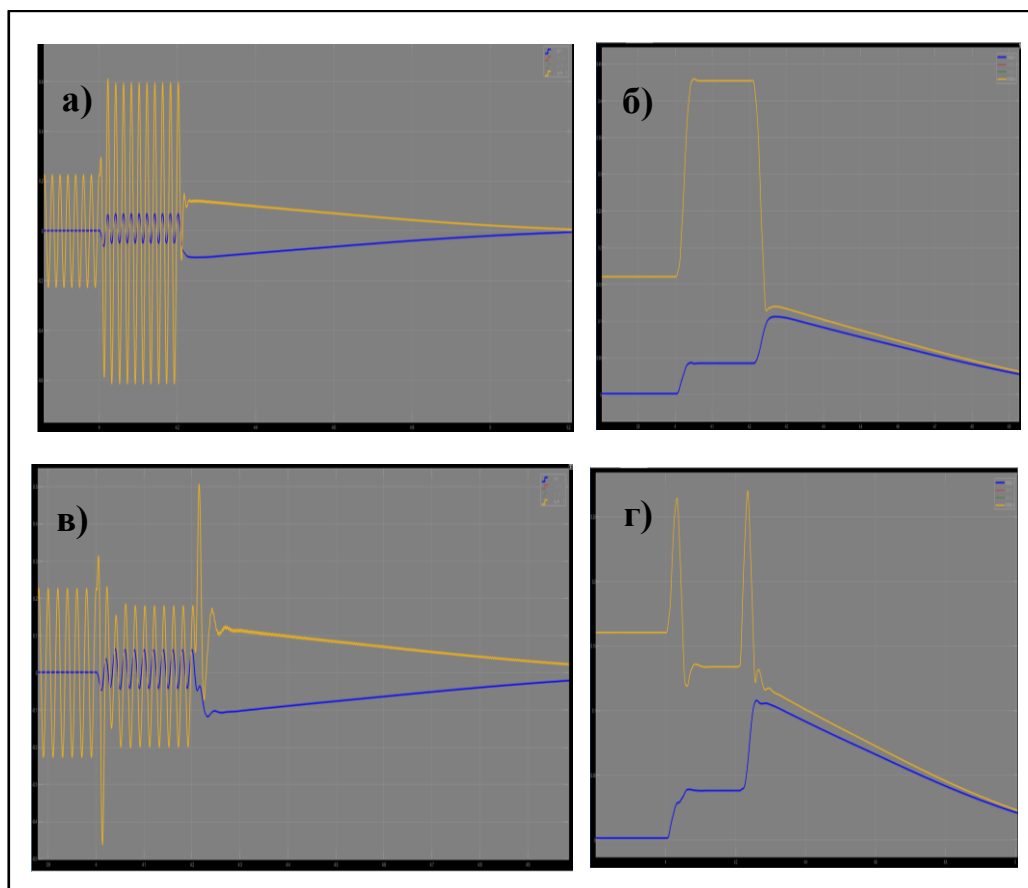


Рисунок 4.27 – Осциллограммы тока нулевой последовательности и однофазного тока утечки через изоляцию и диаграммы их действующих значений при $C_I = 1$ мкФ/фазу: а, б) при отключенном компенсаторе, в, г) при включенном компенсаторе емкостного тока утечки

При включенном компенсаторе в начальный момент утечки импульсное значение тока фазы А снижается до $i_{max} = 460$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,07$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы снижается до $I_{yA} = 134$ мА.

Таким образом, процессе компенсации действующее значение тока однофазной утечки снижается на 68,7%.

В однофазном режиме утечки тока через изоляцию с емкостью 0,5 мкФ/фазу В начальный момент утечки импульсное значение тока поврежденной фазы А достигает i_{max} 295 мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,05$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы составляет $I_{yA} = 186$ мА.

При включенном компенсаторе в начальный момент утечки импульсное значение тока фазы А снижается до $i_{max} = 128$ мА продолжительностью $t_{п.н} = 0,07$ с. Действующее значение тока в режиме однофазной утечки через изоляцию поврежденной фазы снижается до $I_{yA} = 90$ мА.

В процессе компенсации действующее значение тока однофазной утечки снижается в два раза. (на 51,6%).

Спецификой данного режима работы компенсатора является то, что после срабатывания УЗО человек попадает под действие затухающего постоянного напряжения, рекуперированного от электродвигателя через неуправляемый входной выпрямитель преобразователя частоты. В цепи утечки возникает импульс ток, превышающий по амплитуде величину начального импульса i_{max} и имеющего затухающий характер продолжительностью до 0,1 с. За это время в цепи утечки генерируется количество электричества $Q_H = 19,3 - 50$ мА·с. В режиме последующей генерации обратной ЭДС отключаемого электродвигателя количество электричества в цепи утечки достигает значений $Q_{H.ЭДС} = 77,8 - 108,5$ мА·с, что даже без учета $Q_{сз} = 18 - 26,8$ мА·с значительно превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с в кратковременном режиме воздействия (до 1 с).

Данный тип компенсации, реализованный в серийных УЗО, не полностью обеспечивает полную компенсацию емкостного тока в однофазном режиме утечки. Одним из решений данной проблемы является применение устройства пофазной компенсации емкостного тока утечки, разработанного в данной диссертационной работе.

4.4. Результаты анализа режимов утечки тока в подземной комбинированной электрической сети питания ленточного конвейера

В данном разделе приведены результаты имитационного моделирования режимов утечки тока в ПКЭС-3, когда питание ПЧ осуществляется от силового трансформатора по магистральному кабелю протяженностью до 400 м, а от ПЧ до АД – кабелем протяженностью до 600 м и более. Такой вариант построения участковой электрической сети возможен при осуществлении питания ленточного конвейера протяженностью более 1 км с установкой частотно-регулируемых электроприводов 2-х – 3-х асинхронных электродвигателей единичной мощностью до 250 кВт.

Имитационная модель ПКЭС-3, оборудованной УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения, компенсатором емкостного тока утечки, ФКУ, реакторами и СФ приведена на рисунке 4.28.

Для данной модели принята одинаковая протяженность участков кабельной линии до и после ПЧ с активным сопротивлением изоляции $R_I = 35,1 - 300$ кОм/фазу и емкостью $C_I = 0,1 - 1$ мкФ/фазу.

Рассмотрены три варианта однофазной утечки тока:

- 1) при повреждении фазы в кабельной линии до ПЧ;
- 2) при повреждении фазы в кабельной линии после ПЧ;
- 3) при однополюсном прикосновении человека в звене постоянного тока ПЧ.

Результаты моделирования приведены в Приложении 1 (таблицы П1.32 – П1.37).

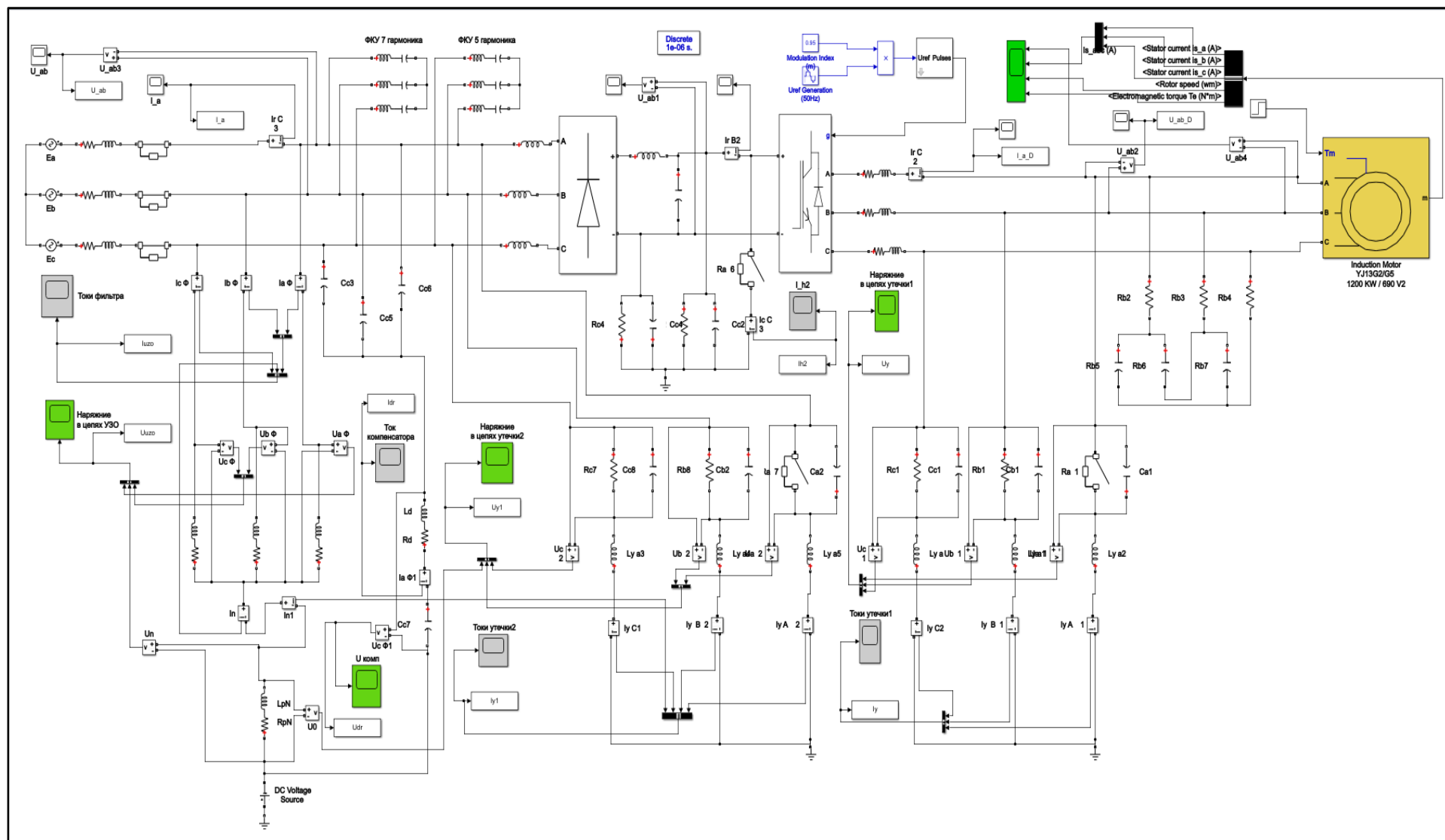


Рисунок 4.28 – Имитационная модель ПКЭС-3

Вариант 1. Повреждение фазы в кабельной линии на участке до ПЧ.

На рисунке 4.29 приведены осциллограммы напряжения в цепях утечки, тока в поврежденной фазе ($R_y = 1$ кОм), токов в ветвях фильтра присоединения и в цепи измерителя УЗО при включенном и отключенном компенсаторе емкостного тока. Параметры изоляции участков электрической сети до и после преобразователя частоты ($R_{I1} = R_{I2} = 180$ кОм/фазу, $C_{I1} = C_{I2} = 0,25$ мкФ/фазу). Суммарная емкость ПКЭС-3 составляет $C_I = 0,5$ мкФ/фазу.

Режим однофазной утечки тока на участке трансформатор – кабельная линия – преобразователь частоты идентичен по своему характеру варианту, рассмотренному в п. 4.3 (ПКЭС-2).

Фактически совпадают действующие значения токов в ветвях присоединения фильтра УЗО: изменяются в диапазоне $I_{FA} = 8,0 - 11,2$ мА,

$I_{FB} = 20,4 - 26$ мА, $I_{FC} = 36 - 41,2$ мА.

Фазные напряжения в ветвях фильтра присоединения УЗО составляют: $U_{FA} = 230 - 322$ В, $U_{FB} = 515 - 667$ В, $U_{FC} = 575 - 720$ В.

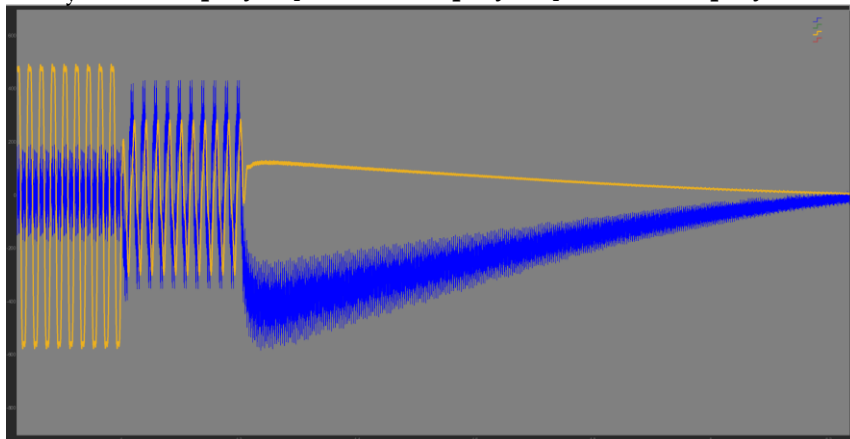
Действующие значения тока и напряжения в цепи измерителя УЗО изменяются соответственно в диапазоне $I_0 = 36 - 41,2$ мА и $U_0 = 170 - 200$ В, что свидетельствует о работоспособности УЗО при действующей уставке на ток срабатывания $I_{сз} = 25$ мА.

Коэффициент несимметрии фазных напряжений в ветвях фильтра УЗО изменяется в пределах $K_{NFU} = 0,6 - 0,7$.

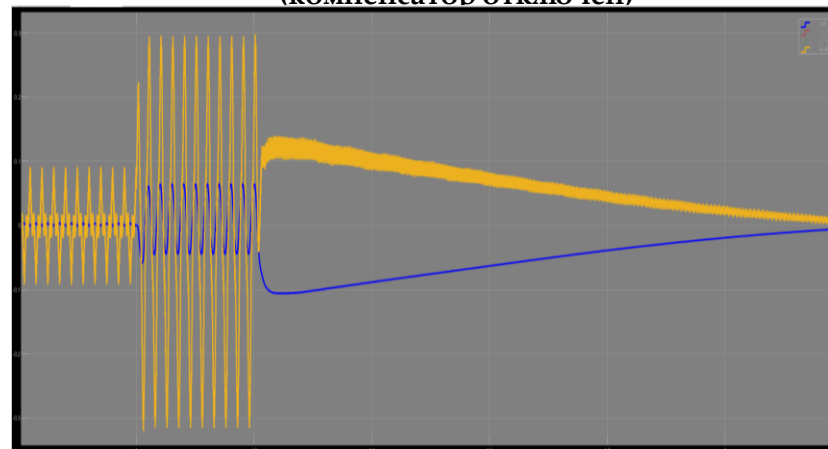
В цепях изоляции высшие гармонические составляющие существенно возрастают, т.к. сказывается влияние токов утечки на протяженном участке после ПЧ. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения возрастают и изменяются в пределах $K_I = 14,9 - 17,3$ % и $K_U = 7,6 - 64,7$ %.

Для данной конфигурации электрической сети положительный эффект комплектации ПКЭС-3 с единым блоком ПЧ-АД практически отсутствует.

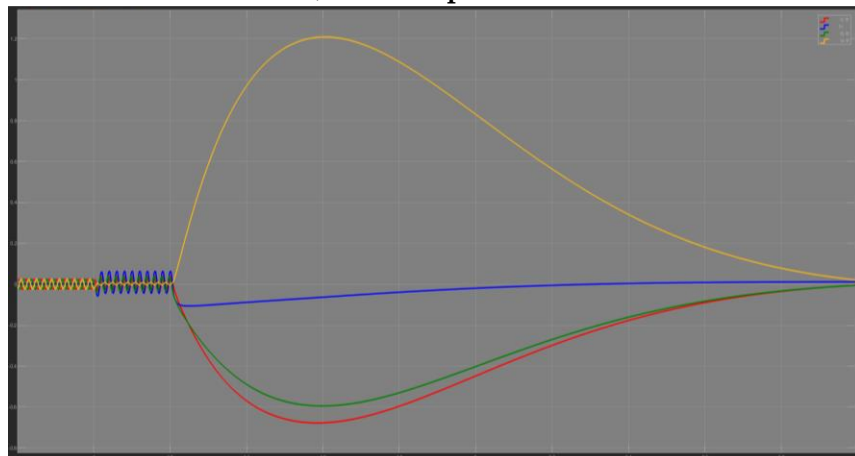
Напряжение в фазе А и цепи измерителя УЗО
 $R_y = 1 \text{ кОм/фазу}$; $R_l = 180 \text{ кОм/фазу}$; $C_l = 0,5 \text{ мкФ/фазу}$



Токи в фазе А и цепи измерителя УЗО
 (компенсатор отключен)



Токи в ветвях фильтра присоединения
 и цепи измерителя УЗО



Токи в фазе А и цепи измерителя УЗО
 (компенсатор включен)

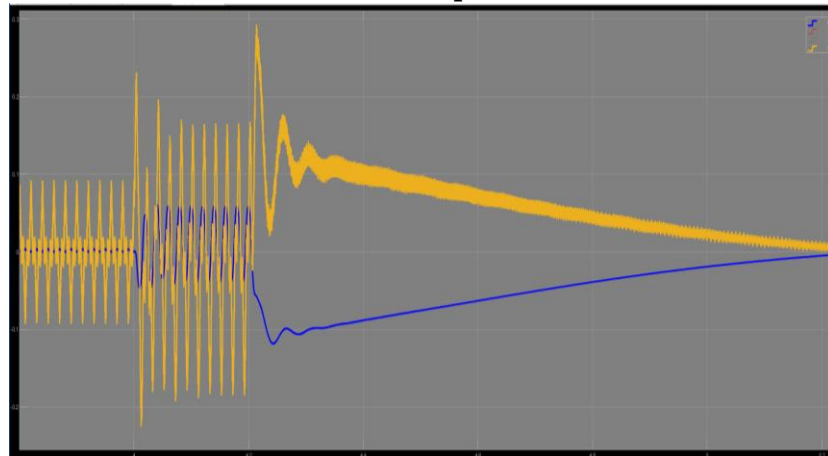


Рисунок 4.29 – Режим однофазной утечки тока в ПКЭС-3 на участке трансформатор – кабельная линия – преобразователь частоты

Анализ показал, что независимо от режима утечки в момент отключения автоматическим выключателем ПКЭС-3 от источника питания токи в ветвях фильтра присоединения УЗО возрастают от десятков мА переменного тока до 1,2 – 1,5 А постоянного тока, протекающего в сети в режиме рекуперации энергии через неуправляемый вентильный выпрямитель преобразователя частоты. При этом выделяемая мощность увеличивается от 2,8 Вт до 100 Вт, что может привести к повышенной тепловой нагрузке на изоляцию и снижению ресурса работы УЗО.

После отключения трансформатора человек также попадает под воздействие обратной ЭДС отключаемого электродвигателя. При этом, через нерегулируемый выпрямитель преобразователя частоты на участок, где произошло прикосновение, трансформируется напряжение постоянного тока с широким спектром гармонических составляющих.

При изменении параметров емкости изоляции кабельной линии в диапазоне $C_I = 0,1 - 1$ мкФ/фазу (компенсирующий дроссель УЗО отключен) максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 105 - 570$ мА. Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания защитного отключения составляет $I_{h1} = 36,5 - 370$ мА, что соответствует количеству электричества $Q_{h.сз} = 7,3 - 74,2$ мА·с.

Максимальное действующее значение тока после срабатывания УЗО и автоматического выключателя $I_{h.max} = 124 - 372$ мА. При продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1 - 1,06$ с количество электричества составляет $Q_{h.эдс} = 61,3 - 195$ мА·с, что превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

При настройке компенсирующего дросселя УЗО в резонанс с емкостью изоляции $C_I = 0,5$ мкФ/фазу количество электричества снижается с 94,5·с до 61,3 мА·с. После отключения питания автоматическим выключателем в цепи утечки возникает импульс тока $i_{имп} = 293$ мА продолжительностью 0,05 с, что за время генерирования обратной ЭДС дополнительно увеличивает $Q_{h.эдс}$ на 14,65 мА.

При настройке компенсирующего дросселя УЗО в резонанс с емкостью изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу количество электричества снижается со 195 мА·с до 65 мА·с. После отключения питания в цепи утечки возникает импульс тока $i_{\text{имп}} = 460$ мА продолжительностью 0,05 с, что за время генерирования обратной ЭДС дополнительно увеличивает $Q_{h.\text{эдс}}$ на 14,65 мА·с.

В данном варианте эффективность работы компенсатора емкости УЗО не подтверждается. Режим однофазной утечки тока в данной конфигурации сети представляет опасность в случае прикосновения к токоведущей части на участке трансформатор – преобразователь частоты.

Вариант 2. Повреждение фазы в кабельной линии на участке после ПЧ.

На рисунке 4.30 приведены осциллограммы напряжения в цепях утечки, тока в поврежденной фазе, токов в ветвях фильтра присоединения и в цепи измерителя УЗО при включенном и отключенном компенсаторе.

Режим однофазной утечки тока на участке ПЧ – КЛ – АД идентичен по своему характеру варианту, рассмотренному в п. 4.2 (ПКЭС-1).

Фактически совпадают действующие значения токов в ветвях присоединения фильтра УЗО: изменяются в диапазоне $I_{FA} = 9,0 - 11,7$ мА, $I_{FB} = 19,2 - 25$ мА, $I_{FC} = 21 - 27$ мА.

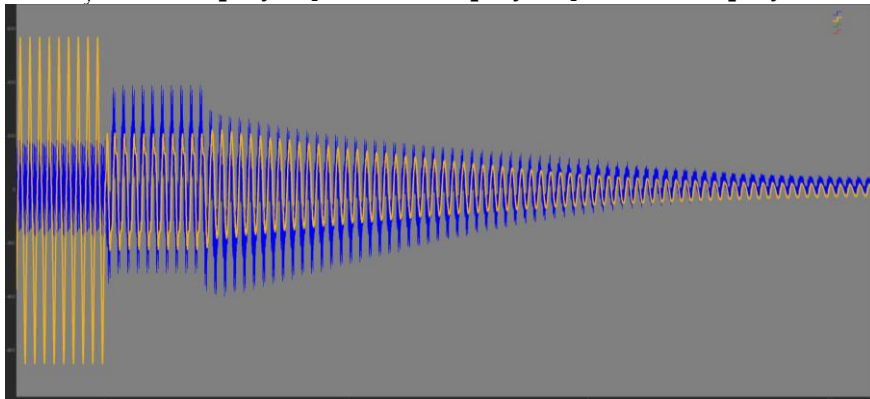
Фазные напряжения в ветвях фильтра присоединения УЗО составляют: $U_{FA} = 60 - 332$ В, $U_{FB} = 540 - 590$ В, $U_{FC} = 565 - 664$ В.

Действующие значения тока и напряжения в цепи измерителя УЗО изменяются соответственно в диапазоне $I_0 = 29 - 33$ мА и $U_0 = 149 - 164$ В, что свидетельствует о работоспособности УЗО при действующей уставке на ток срабатывания $I_{сз} = 25$ мА.

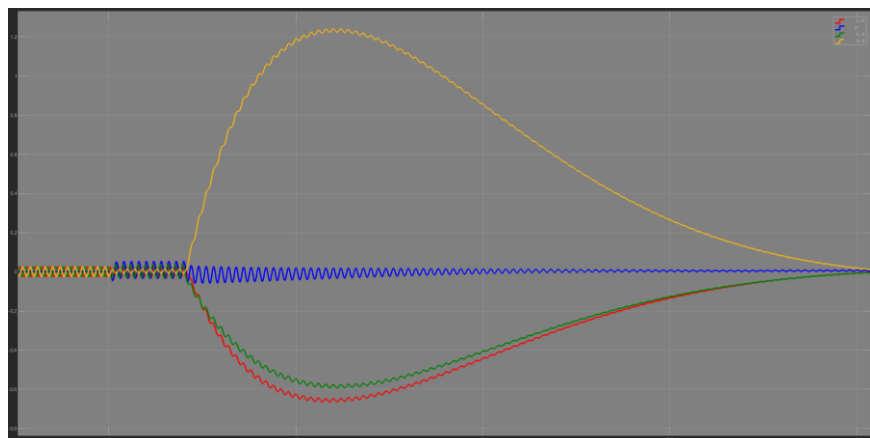
Коэффициент несимметрии фазных напряжений в ветвях фильтра УЗО изменяется в пределах $K_{NFU} = 0,51 - 0,58$.

В цепях изоляции высшие гармонические составляющие существенно возрастают, т.к. сказывается влияние токов утечки на протяженном участке до ПЧ. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих возрастают и изменяются в пределах $K_I = 14,8 - 21,9\%$ и $K_U = 8,93 - 64\%$.

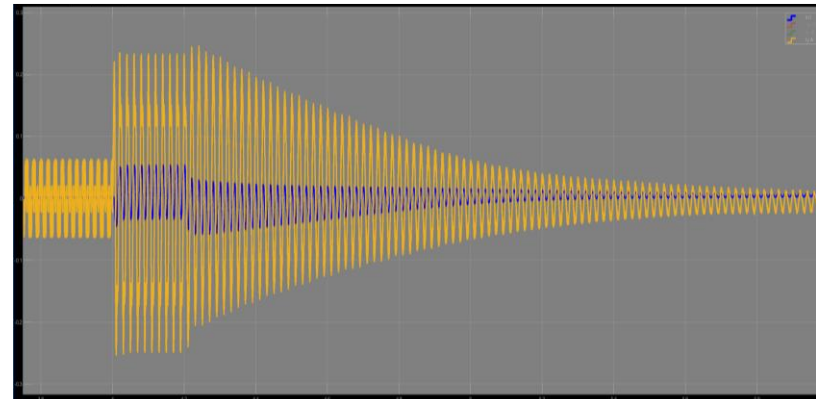
Напряжение в фазе А и цепи измерителя УЗО
 $R_v = 1 \text{ кОм/фазу}$; $R_I = 180 \text{ кОм/фазу}$; $C_I = 0,5 \text{ мкФ/фазу}$



Токи в ветвях фильтра присоединения
 и цепи измерителя УЗО



Токи в фазе А и цепи измерителя УЗО
 (компенсатор отключен)



Токи в фазе А и цепи измерителя УЗО
 (компенсатор включен)

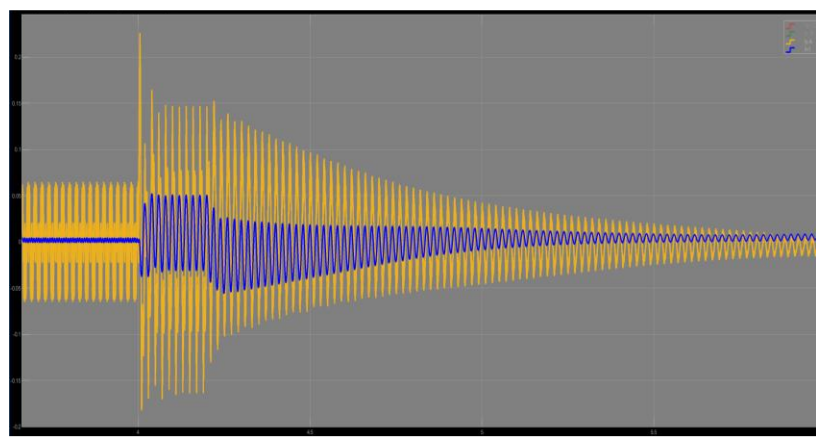


Рисунок 4.30 – Режим однофазной утечки тока в ПКЭС-3 на участке преобразователь частоты – кабельная линия – электродвигатель

В этом случае положительный эффект комплектации ПКЭС с единым блоком трансформатор - преобразователь частоты в составе энергопоезда также практически отсутствует.

Анализ показал, что независимо от режима утечки в момент отключения автоматическим выключателем ПКЭС от источника питания токи в ветвях фильтра присоединения УЗО также возрастают от десятков мА переменного тока до 1,2 – 1,5 А постоянного тока, протекающего в сети в режиме рекуперации энергии через неуправляемый вентильный выпрямитель преобразователя частоты.

После отключения трансформатора человек попадает под воздействие обратной ЭДС отключаемого электродвигателя. При этом, преобразователь частоты и электродвигатель генерируют в сеть обратную ЭДС с сформированным ШИМ прямоугольным импульсом напряжения с широким спектром гармонических составляющих.

При изменении параметров емкости в диапазоне $C_I = 0,1 - 1$ мкФ/фазу (компенсирующий дроссель УЗО отключен) максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 83 - 385$ мА. Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания УЗО составляет $I_{h1} = 31,4 - 226$ мА, что количеству электричества $Q_{h.c3} = 6,28 - 45$ мА·с.

Максимальное действующее значение тока через человека после срабатывания УЗО и автоматического выключателя $I_{h.max} = 30 - 300$ мА. С учетом продолжительности воздействия $t_{эдс} = 2,3 - 2,4$ с количество электричества составляет $Q_{h.эдс} = 36 - 345$ мА·с, что превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

С точки зрения электробезопасности данный режим более опасен, т.к. человек попадает непосредственно под действие обратной ЭДС электродвигателя в то время, как при прикосновении на участке перед преобразователем часть энергии рассеивается в нем и время воздействия сокращается более чем в два раза.

При настройке компенсирующего дросселя УЗО в резонанс с емкостью $C_I = 0,5$ мкФ/фазу количество электричества снижается с $172 \text{ мА} \cdot \text{с}$ до $91,2 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

При настройке компенсирующего дросселя УЗО в резонанс с емкостью $C_I = 1$ мкФ/фазу количество электричества снижается с $345 \text{ мА} \cdot \text{с}$ до $103,2 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

В данном варианте эффективность работы компенсатора емкости УЗО не подтверждается. Режим однофазной утечки тока в данной конфигурации сети представляет опасность в случае прикосновения к токоведущей части на участке трансформатор – преобразователь частоты.

Вариант 3. При однополюсном прикосновении человека в звене постоянного тока ПЧ.

Режим однополюсного прикосновения в звене постоянного тока преобразователя частоты идентичен по своему характеру вариантам, рассмотренным в п. 4.2 и п. 4.3.

При изменении параметров изоляции кабельной линии на участке ПЧ – АД в диапазоне $R_I = 80 - 300$ кОм/фазу и $C_I = 0,05 - 0,5$ мкФ/фазу максимальное амплитудное значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 620$ мА. Действующее значение установившегося тока утечки за время срабатывания защитного отключения $t_{сз} = 0,2$ с составляет $I_{h1} = 115$ мА, что соответствует прохождению через человека количества электричества $Q_{h.сз} = 57,5 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

Максимальное действующее значение тока после отключения электродвигателя от источника питания $I_{h.max} = 129$ мА. При продолжительности воздействия $t_{эдс} = 1,45$ с количество электричества составляет $Q_{h.эдс} = 93 \text{ мА} \cdot \text{с}$, что даже без учета $Q_{h.сз}$ превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

Ток утечки при прикосновении к полюсу в звене постоянного тока не зависит от состояния контролируемой УЗО изоляции ПКЭС и работы компенсатора емкостного тока утечки. Для двигателей мощностью менее 45 кВт его потенциальную опасность можно ограничить по длительности воздействия за счет динамического торможения преобразователем частоты.

4.5. Устройство комбинированного динамического торможения электродвигателя в подземной комбинированной электрической сети

Приведенный выше анализ показал, что в случае однофазной утечки тока через изоляцию в ПКЭС после срабатывания УЗО электродвигатель переходит в режим генерирования обратной ЭДС. При этом количество электричества, проходящего в цепи утечки, может превысить допустимые значения.

Продолжительность опасного воздействия определяется уровнем модулированного напряжения в начальный момент после отключения питания и скоростью затухания электромагнитного переходного процесса в электродвигателе, определяемой постоянной времени ротора $T_f = X_f/R_f$. Для электродвигателей мощностью менее 45 кВт длительность затухания обратной ЭДС изменяется в пределах $t_{эдс} \approx 1,8 - 3,5$ с. За это время ток утечки в зависимости от фазного напряжения электрической сети относительно земли и от параметров изоляции снижается до предельно допустимого уровня опасного воздействия $I_{дл.доп} = 6$ мА [156].

Одним из наиболее эффективных способов ограничения режима генерирования обратной ЭДС отключаемого в ПКЭС электродвигателя является его торможение.

В настоящее время известны три основных способа торможения: рекуперативное; динамическое; противовключение.

В частотно-регулируемых электроприводах торможение противовключением не применяется, т.к. в этом случае в электрической сети протекают большие токи и возникают трехкратные потери энергии по сравнению с динамическим торможением.

В современных ПКЭС применяется система неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения – асинхронный электродвигатель, для которой наиболее приемлемым является реализация способа динамического торможения преобразователем частоты тормозным резистором в звене постоянного тока.

Для осуществления режима динамического торможения в звено постоянного тока преобразователя параллельно емкости между полюсами подключается тормозной резистор, что позволяет при переходе электродвигателя в режим генерирования обратной ЭДС часть рекуперированной через АИН энергии преобразовать в тепловую энергию рассеяния за счет нагрева резистора.

В настоящее время выпускаются ПЧ с встроенными в корпус тормозными резисторами. При мощностях электродвигателей более 30 кВт применяются выносные тормозные модули управления тормозными резисторами.

При этом, имеются ряд серьезных ограничений в области реализации данного способа торможения. Прежде всего электроустановка должна работать с нечастыми коммутациями ($P_{\text{В}} < 30\%$), в режимах близких к вентиляторному или холостого хода, мощность и сопротивление тормозного резистора не должны превышать рекомендованных значений по величине омического сопротивления и масса-габаритным параметрам и т.д.

Ограничением использования тормозных резисторов в специфических условиях ведения подземных горных работ является необходимость интенсивного отвода тепла от резисторного блока, что технически сложно обеспечить с точки зрения взрывозащищенного исполнения оболочек и корпусов электрооборудования. Вместе с тем применение динамического торможения электродвигателей мощностью менее 45 кВт, обладающих наибольшим временем генерирования обратной ЭДС, имеет хорошую перспективу в плане реализации.

На имитационной модели ПКЭС (рисунок 4.28) было проведено исследование тормозных режимов при инерционном торможении отключаемого электродвигателя («свободный выбег»), динамического торможения тормозным резистором в звене постоянного тока и динамического торможения посредством включения в статорную цепь внешнего регулируемого источника постоянного тока.

На рисунке 4.29 приведены характерные осциллограммы режимов торможения при возникновении однофазной утечки тока через изоляцию, показал следующее.

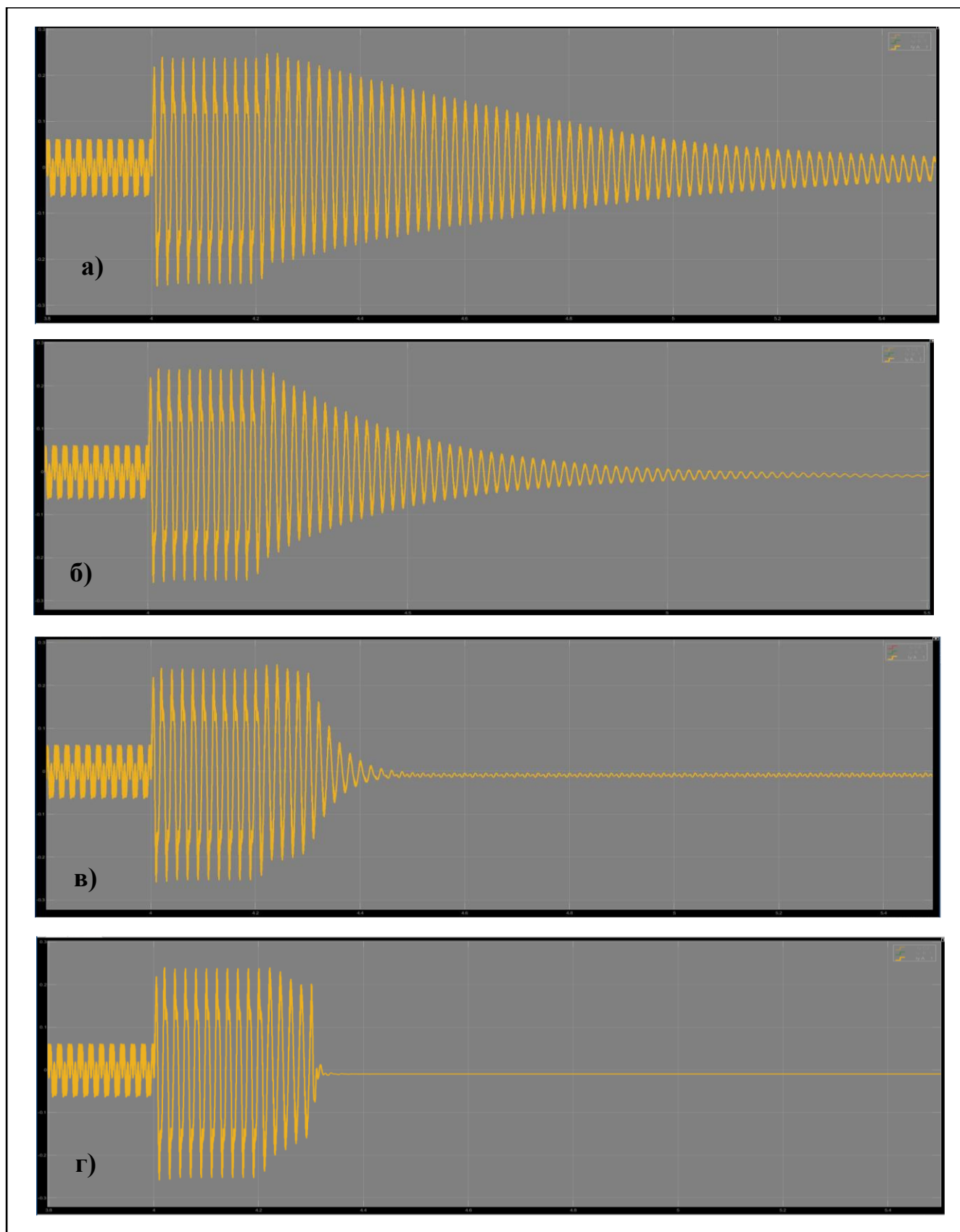


Рисунок 4.29 – Режимы торможения электродвигателя: а) инерционный; б) тормозным резистором преобразователя частоты; в) наложением постоянного тока от независимого источника; г) комбинированный

1. В инерционном режиме длительность опасного воздействия обратной ЭДС отключаемого двигателя мощностью 18,5 кВт достигает от 1 до 2,4 с. При этом количество электричества в цепи утечки превышает допустимые значения в 2 – 3 раза (до 170 мА·с без учета энергии, генерируемой за время срабатывания УЗО).

2. Эффективность динамического торможения преобразователем частоты и тормозным резистором ограничена минимально допустимым значением его сопротивления, необходимого для теплового рассеяния рекуперированной энергии. Максимально достижимое снижение времени генерирования обратной ЭДС не превышает 50% от времени инерционного торможения и составляет 0,5 – 1,2 с, что также недостаточно для снижения опасного уровня утечки тока в данном режиме.

3. Наиболее эффективным является включение в статорную цепь отключаемого электродвигателя регулятора постоянного тока от независимого источника. В этом случае в зависимости от силы приложенного постоянного тока скорость гашения обратной ЭДС достигает 0,2 – 0,5 с. Эффект торможения достигается при напряжении внешнего источника не менее 150 В и сопротивлении регулятора тока 1 Ом. Недостатком данного способа является необходимость внешнего источника постоянного тока, что в условиях ПКЭС затруднительно, а также размещения тормозного блока во взрывозащищенной оболочке.

В диссертационной работе предложен комбинированный способ динамического торможения электродвигателя, получающего питание от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения, который сочетает в себе два принципа действия: динамическое торможение тормозным резистором и от внутреннего источника постоянного тока, которым является ПЧ.

Применение данного способа позволяет решить следующие задачи.

1. Значительно ограничить опасное влияние генерируемой отключаемым электродвигателем обратной ЭДС в случае однофазной утечки тока через изоляцию.

2. Ограничить величину тока, рекуперированного через неуправляемый выпрямитель, в ветвях фильтра присоединения УЗО к электрической сети.
3. Расширить диапазон регулируемого торможения за счет дискретного изменения сопротивления тормозных резисторов.

В качестве реализации данного способа разработано комбинированное устройство динамического торможения асинхронного электродвигателя преобразователем частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения.

Устройство предназначено для увеличения диапазона регулирования тормозного тока в нормальном режиме работы и ограничения опасного влияния обратной ЭДС отключаемого УЗО электродвигателя в аварийном режиме утечки тока через изоляцию.

На рисунке 4.30 представлена структурная схема комбинированного устройства динамического торможения асинхронного электродвигателя (АД) преобразователем частоты (ПЧ) с неуправляемым выпрямителем (В) и автономным инвертором напряжения (АИН), включенного в электрическую сеть с автоматическим выключателем (АВ) с отключающей катушкой (ОК), замыкающим контактом (К) и устройством защитного отключения (УЗО).

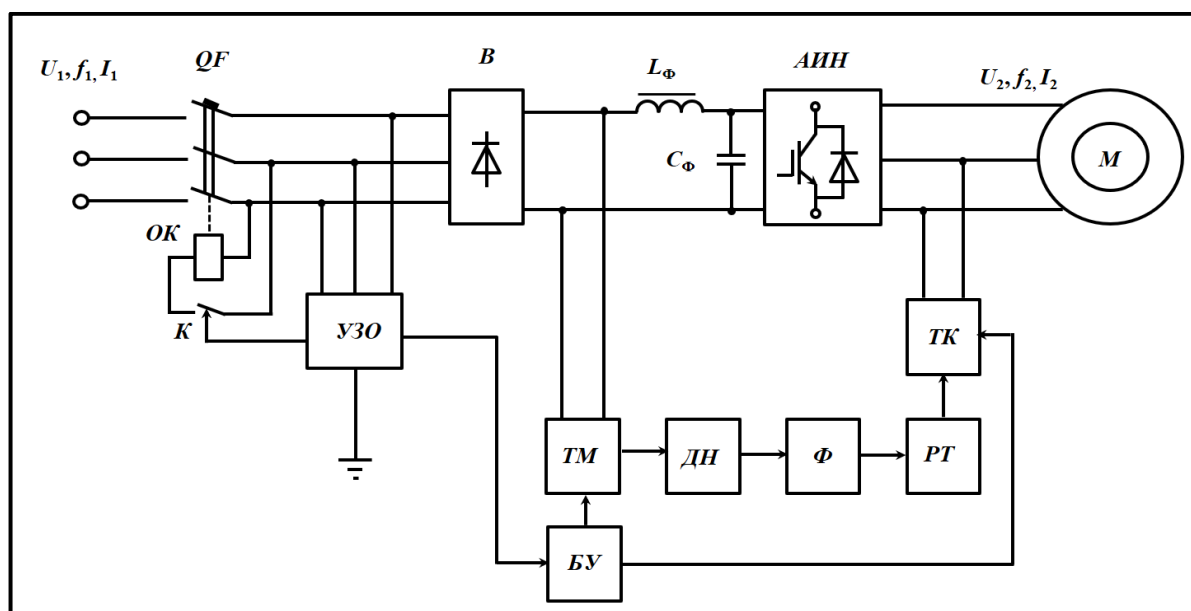
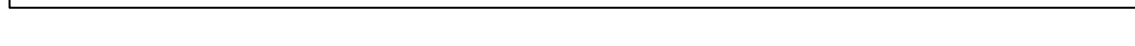


Рисунок 4.30 – Структурная схема комбинированного устройства динамического торможения асинхронного электродвигателя (КУДТ)



Принципиальное устройство системы термической обработки изделий ТА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Резюме

затвора транзисторов VT_1 , VT_4 , предназначены для защиты транзисторов VT_2 , V_4 от пробоя повышенным напряжением.

В первом тормозном режиме для торможения электродвигателя, отключаемого автоматическим выключателем от источника питания, блок управления тормозным модулем и двухполюсным тиристорным контактором подает управляющий сигнал на транзистор VT_2 , который открывается и через резистор R_3 ограничения тока заряда емкости затвора транзистора VT_1 подает сигнал на его открытие. Блок управления блокирует подачу сигналов на открытие управляющего транзистора VT_4 , биполярного транзистора VT_3 и тиристоров двухполюсного тиристорного контактора. Ток протекает от положительного полюса звена постоянного тока преобразователя частоты через тормозной резистор R_4 и транзистор VT_1 к отрицательному полюсу.

На тормозном резисторе R_4 происходит тепловое рассеивание электрической энергии, отдаваемой отключаемым асинхронным двигателем через автономный инвертор тока преобразователя частоты, стабилизация напряжения в звене постоянного тока и ограничение проходящей через неуправляемый выпрямитель амплитуды обратного постоянного тока в ветвях фильтра присоединения устройства защитного отключения к электрической сети.

Во втором тормозном режиме блок управления тормозным модулем и двухполюсным тиристорным контактором блокирует подачу управляющего сигнала на транзистор VT_4 . Ток через резистор R_3 не протекает и биполярный транзистор VT_1 закрыт. Блок управления подает управляющий сигнал на транзистор VT_3 , который открывается и через резистор R_7 ограничения тока заряда емкости затвора биполярного транзистора VT_4 подает сигнал на его открытие. Ток протекает от положительного полюса звена постоянного тока преобразователя частоты через последовательно включенные тормозные резисторы R_6 , R_8 и транзистор VT_4 к отрицательному полюсу. Блок управления блокирует подачу управляющих сигналов на открытие тиристоров двухполюсного тиристорного контактора. На последовательно включенных тормозных резисторах R_6 , R_7 происходит тепловое рассеивание электрической энергии, рекуперированной

отключаемым асинхронным двигателем через автономный инвертор тока преобразователя частоты. При этом время гашения обратной ЭДС отключаемого электродвигателя во втором тормозном режиме увеличивается.

В случае возникновения однофазной утечки тока через изоляцию срабатывает устройство защитного отключения и подает сигнал на замыкание контакта в цепи отключающей катушки автоматического выключателя. Происходит отключение электродвигателя от источника питания и переход в режим генерирования обратной ЭДС.

Устройство защитного отключения подает сигнал на блок управления тормозным модулем и двухполюсным тиристорным контактором, который блокирует подачу управляющего сигнала на транзистор VT_1 , поэтому транзистор VT_2 закрыт.

Блок управления выполняет подачу управляющих сигналов на открытие тириستоров двухполюсного тиристорного контактора и на транзистор VT_4 , который открывается и через резистор R_7 ограничения тока заряда емкости затвора транзистора VT_4 подает сигнал на его открытие.

В этом случае тормозные сопротивления R_6, R_8 представляют собой делитель напряжения, ограничивающий амплитуду напряжения постоянного тока, подаваемого на П-образный индуктивно-емкостной фильтр тока.

Через регулятор тока динамического торможения и двухполюсный тиристорный контактор постоянный ток подается на любые две фазы из трех, к которым подключены статорные обмотки асинхронного электродвигателя и тормозит электродвигатель.

Двухполюсный тиристорный контактор постоянного тока составлен из двух синхронизированных однополюсных контакторов с конденсаторной коммутацией, подключенных к полюсам звена постоянного тока встречно.

Коммутирующие конденсаторы C_3, C_4 подключены параллельно основным тиристорам VS_1, VS_3 , через которые постоянный ток от регулятора тока динамического торможения подается на статорные обмотки электродвигателя. Так как нагрузкой является активно-индуктивные сопротивления статорных

цепей асинхронного электродвигателя, то с учетом протекания генерируемого тока в интервале времени включения тиристорного контактора установлен обратный диод VD_5 . В схеме управления тиристорным контактором предусмотрены коммутирующие тиристоры VS_2 , VS_3 , позволяющие за время блокировки диодами VD_3 , VD_4 перезаряда конденсаторов C_3 , C_4 подготовить основные тиристоры к отключению.

По сравнению с электромагнитными контакторами применение двухполюсного тиристорного контактора обусловлено необходимостью быстрой коммутацией цепей постоянного тока, позволяющей сократить время включения устройства после срабатывания УЗО и автоматического выключателя менее 0,1 с и ограничить бросок тока, возникающий при замыкании силовых контактов электромагнитного контактора.

Применение предлагаемого устройства позволяет 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 или человека, прикоснувшегося к токоведущей части электрооборудования.

4.6. Выводы

В данной главе решена научная задача, посвященная исследованию режимов утечки тока в подземных комбинированных электрических сетях.

Рассмотрены процессы, происходящие в изоляции и в схеме замещения УЗО в режимах симметричной и однофазной утечки тока для трех вариантов комплектования подземного участка электрической сети, оборудованной УЗО с $3RL$ -фильтром и компенсатором, реакторами и ФКУ, подключенными до ПЧ, реакторами и СФ, подключенными после ПЧ перед АД.

В результате анализа сделаны следующие выводы.

1. Применение ФКУ, реакторов и СФ положительно сказывается на качестве электроэнергии, поступающей к электродвигателю через преобразователь частоты, и может быть предложено к практической реализации

при условии выполнения требований, предъявляемых к взрывозащищенному электрооборудованию шахт. Одним из ключевых условий является обеспечение температурного контроля внутри корпусов ФКУ и синус-фильтров при максимально возможном отводе тепла. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U (%) снижается с 8,05% до 0,22%, Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (%) снижается 23,6% до 0,16%.

2. Наличие ФКУ, реакторов и синус-фильтров практически не оказывает влияния как на гармонический состав, так и на величину коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения сети относительно земли и токов утечки через изоляцию. В симметричном и однофазном режимах утечки в изоляции наибольшее искажение вносят нечетные 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих в режиме $I_y^{(3)}$ изменяются в пределах $K_I = 23 - 95\%$, $K_U = 10,6 - 15,8\%$. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих в режиме $I_y^{(1)}$ изменяются в пределах $K_I = K_U = 13,6 - 37,9\%$.

3. Наличие наводимых в цепях утечки тока высших гармонических составляющих в симметричном режиме и режиме однофазной утечки тока может привести к нарушению магнитной совместимости при работе электронной измерительной схемы, блока питания и компенсатора емкостного тока утечки УЗО и представлять потенциальную опасность в случае прикосновения к токоведущим частям электрооборудования. Наибольшее влияние оказывает 3-я гармоническая составляющая напряжения, которая составляет 15,8% в ветвях фильтра присоединения и 10,8% в цепи измерителя УЗО.

4. Опасное воздействие тока утечки при прикосновении к полюсу в звене постоянного тока для двигателей мощностью менее 45 кВт можно ограничить по длительности воздействия только за счет динамического торможения преобразователем частоты.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ УТЕЧКИ ТОКА В ПОДЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

5.1. Исходные положения

Степень опасности переходных процессов при эксплуатации шахтного и рудничного электрооборудования обусловлена состоянием изоляции электрической сети, типом применяемой защиты от утечек (реле УАКИ, АЗАК, САЗУ, АЗУР и др.), принятым классом напряжения (380, 660, 1140 В) и режимами работы горных машин.

Анализ показывает, что величина и характер изменения тока утечки определяется уровнем сопротивления изоляции сети и длительностью существования остаточного напряжения, обусловленного режимом генерирования обратной ЭДС и зарядной емкостью конденсаторных установок. При этом длительность воздействия тока на человека зависит от параметров двигателей и режима их работы, а уровень сопротивления изоляции определяется условиями эксплуатации.

Целью настоящей главы является исследование переходных процессов в подземной электрической сети и определение степени опасности токов утечки за время срабатывания средств защитного отключения и при генерировании отключаемыми электродвигателями обратной ЭДС.

Основой математической модели для анализа токов утечки, уровней напряжения и параметров изоляции электрической сети относительно земли являлся вывод и составление системы дифференциальных уравнений для обобщенной схемы замещения электрической сети, системы дифференциальных уравнений для анализа режимов генерирования электродвигателями обратной ЭДС при утечке тока через изоляцию, выполненный во второй главе диссертации.

На основании алгоритма расчета параметров переходных процессов разработано соответствующее программное обеспечение.

Результаты экспериментальных исследований составляют основу для определения взаимосвязи между параметрами и режимами работы электрооборудования и электрических сетей, параметрами УЗО и параметрами тела человека, который может оказаться под опасным действием электрического тока.

Данные физического моделирования и экспериментальных исследований в производственных условиях используются при разработке, испытании и последующей эксплуатации технических средств обеспечения электробезопасности.

5.2. Исследование переходных процессов в цепях утечки тока за время срабатывания УЗО

Исследование переходных процессов при утечке тока за время срабатывания УЗО выполнялось на имитационных моделях с $3RL$ -фильтром присоединения к электрической сети (рисунок 5.1) и $3VDR$ -фильтром присоединения (рисунок 5.2) и компенсатором емкостного тока утечки.

Моделирование осуществлялось для режима однофазной утечки тока при $R_h = 1$ кОм в фазе А электрической сети напряжением $U_F = 660$ В и симметричных параметрах изоляции $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,5$ мкФ/фазу и $C_I = 1$ мкФ/фазу. Параметры УЗО принимались в соответствии параметрами схем замещения, приведенными в пункте 2.2 второй главы диссертации. Время срабатывания УЗО и автоматического выключателя принималось равным $t_{с.з.} = 0,2$ с.

На рисунке 5.3 приведены характерные осциллограммы токов утечки в сети с активно-индуктивным фильтром присоединения УЗО.

На рисунке 5.4 приведены характерные осциллограммы токов в ветвях $3RL$ -фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО.

При емкости изоляции $C_I = 0,5$ мкФ/фазу и отключенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение тока переходного процесса $I_{пп1}$ нарастает до установившегося

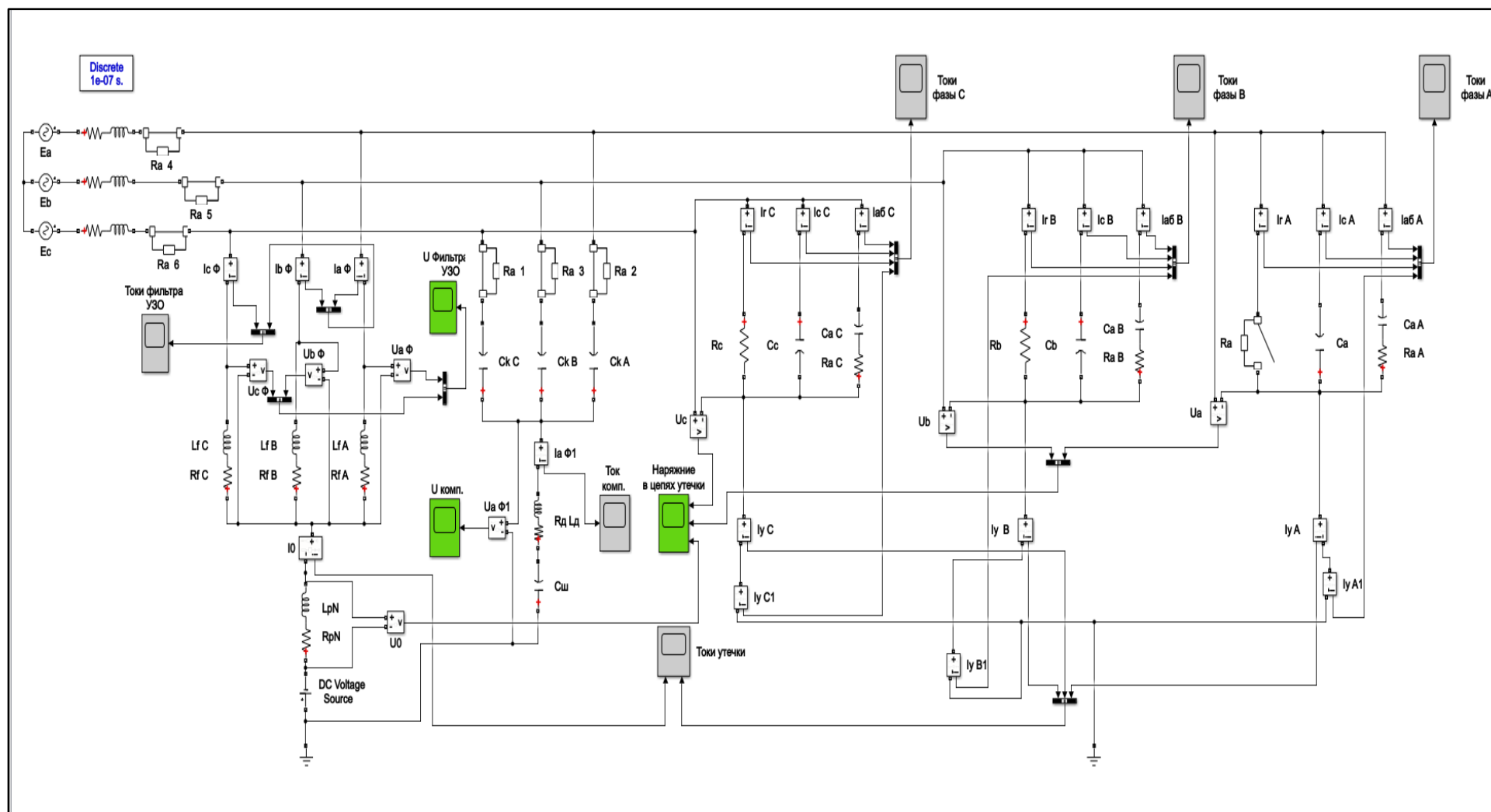


Рисунок 5.1 – Имитационная модель с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО к электрической сети и компенсатором емкостного тока утечки

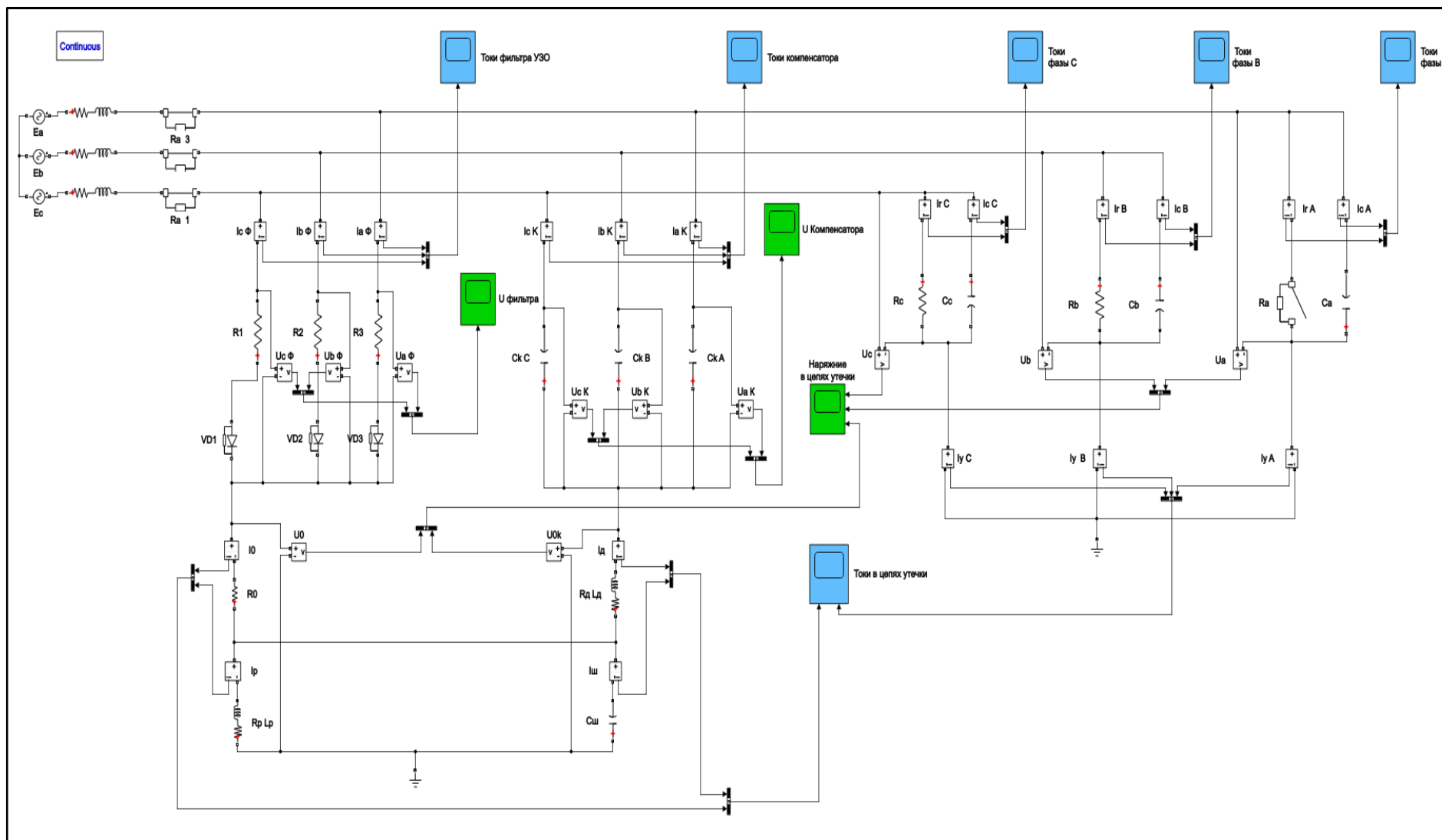


Рисунок 5.2 – Имитационная модель с $3VDR$ -фильтром присоединения УЗО к электрической сети и компенсатором емкостного тока утечки

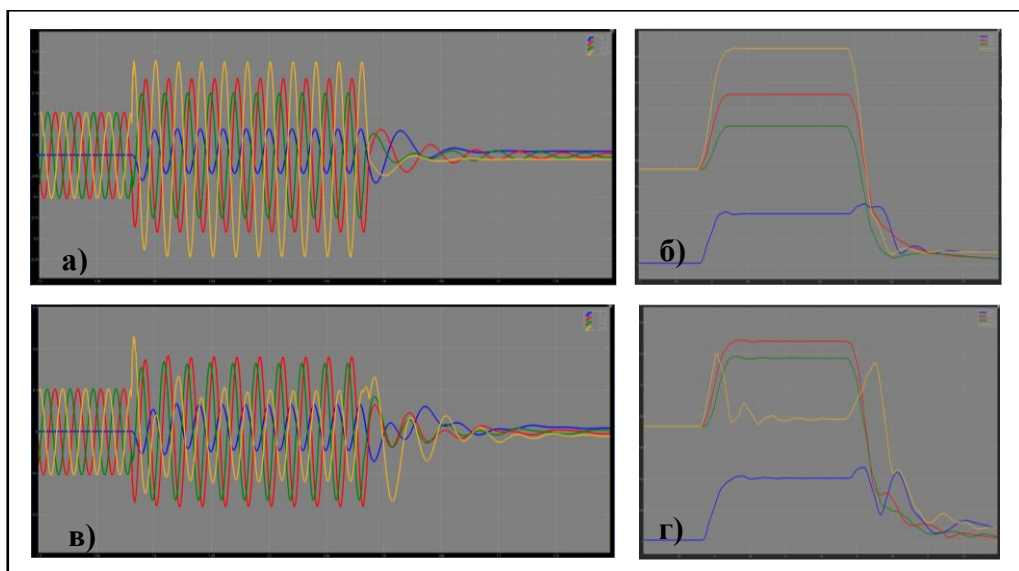


Рисунок 5.3 – Осциллограммы и диаграммы токов утечки в электрической сети с $3RL$ -фильтром присоединения УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 0,5$ мкФ/фазу:

а, б) – компенсатор отключен; в, г) – компенсатор включен

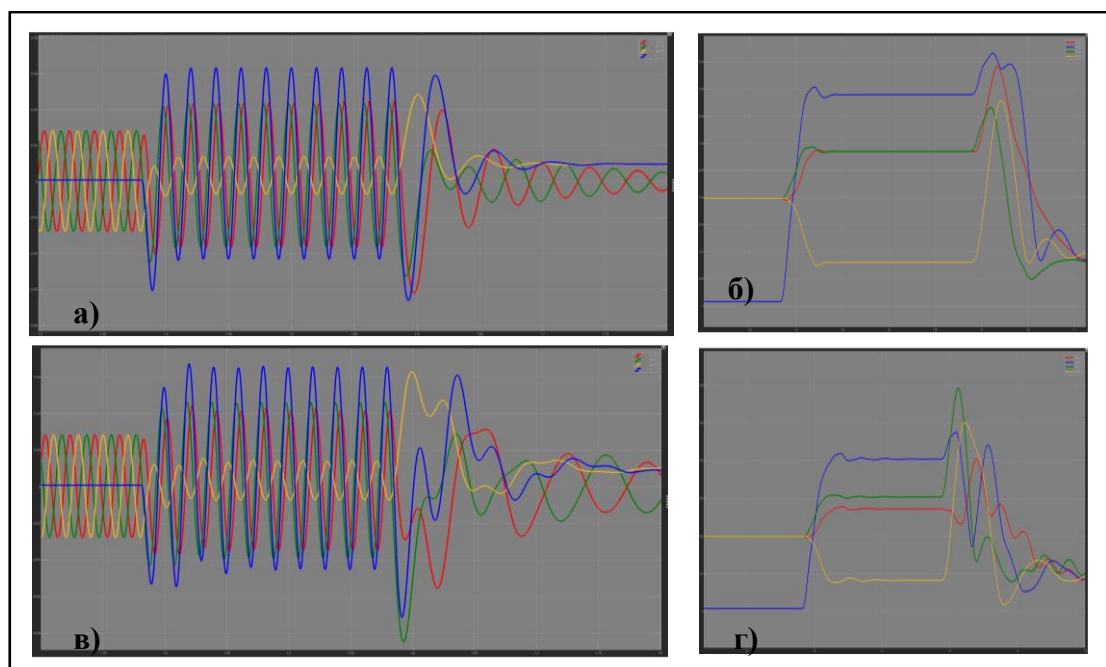


Рисунок 5.4 – Осциллограммы и диаграммы токов в ветвях $3RL$ -фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу,

$C_I = 0,5$ мкФ/фазу: *а, б) – компенсатор отключен; в, г) – компенсатор включен*

значения $I_y = 166,5$ мА за $t_{\text{пн1}} = 0,05$ с. При этом количество электричества в цепи утечки за время срабатывания УЗО составляет $Q_{h.сз} = 33,3$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки ток затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{пн2}} = 0,12$

с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 9,7 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 43,2$ мА·с, что критически близко к допустимому в кратковременном режиме воздействия $Q_{доп} = 50$ мА·с.

За время срабатывания УЗО в ветвях фильтра напряжение в фазах *B* и *C* находится на уровне 665 В. После отключения автоматического выключателя происходит возрастание тока в ветвях фильтра с 35 мА до 60 мА. Автоколебательный процесс затухания тока в цепях УЗО имеет продолжительность 0,15 с.

При емкости изоляции $C_I = 0,5$ мкФ/фазу и включенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение тока переходного процесса достигает $I_{п1} = 120$ мА, затухающего до установившегося тока $I_y = 78$ мА за $t_{п1} = 0,15$ с, что сопоставимо с временем срабатывания защитного отключения. При этом количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.сз} = 19,8$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки возникает бросок тока до $I_{п2} = 114$ мА который затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{п2} = 0,25$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 13,5 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 33,3$ мА·с, что меньше допустимого в кратковременном режиме воздействия $Q_{доп} = 50$ мА·с.

За время срабатывания УЗО в ветвях фильтра напряжение в фазах *B* и *C* находится на уровне 650 – 700 В. После отключения автоматического выключателя происходит возрастание тока в ветвях фильтра до 60 мА, что обусловлено разрядом емкости изоляции электрической сети. Автоколебательный процесс затухания тока имеет продолжительность 0,15 с.

Степень компенсации емкостного тока составляет 53%, что является характерным для данного типа компенсации емкостного тока утечки.

При емкости изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу и отключенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение ток переходного процесса нарастает до установившегося значения

$I_y = 313,5$ мА за $t_{\text{п1}} = 0,06$ с. При этом количество электричества в цепи утечки за время срабатывания УЗО составляет $Q_{h.c3} = 62,7$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки ток затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{п2}} = 0,05$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 7,8 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 70,5$ мА·с, что превышает значение допустимого в кратковременном режиме воздействия $Q_{\text{доп}} = 50$ мА·с.

За время срабатывания УЗО в ветвях фильтра напряжение в фазах *B* и *C* находится на уровне 565 – 670 В. После отключения автоматического выключателя происходит возрастание тока в ветвях фильтра до 65 мА. Автоколебательный процесс затухания тока имеет продолжительность 0,18 с.

При емкости изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу и включенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение тока переходного процесса достигает $I_{\text{п1}} = 225$ мА, затухающего до установившегося тока $I_y = 83$ мА за $t_{\text{п1}} = 0,07$ с. При этом количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.c3} = 26,3$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки возникает бросок тока до $I_{\text{п2}} = 172$ мА который затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{п2}} = 0,25$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 17,5 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 43,8$ мА·с, что критически близко $Q_{\text{доп}} = 50$ мА·с.

За время срабатывания УЗО в ветвях фильтра напряжение в фазах, уровень тока и длительность затухания переходного процесса по своим действующим значениям и продолжительности аналогичны предыдущим данным для режима утечки через емкость 0,5 мкФ/фазу. Степень компенсации емкостного тока составляет 54%.

Рассмотрим переходные процессы при возникновении однофазной утечки тока в подземной электрической сети с активно-вентильным 3VDR-фильтром УЗО.

На рисунке 5.5 приведены характерные осциллограммы токов утечки в сети с 3VDR-фильтром присоединения УЗО.

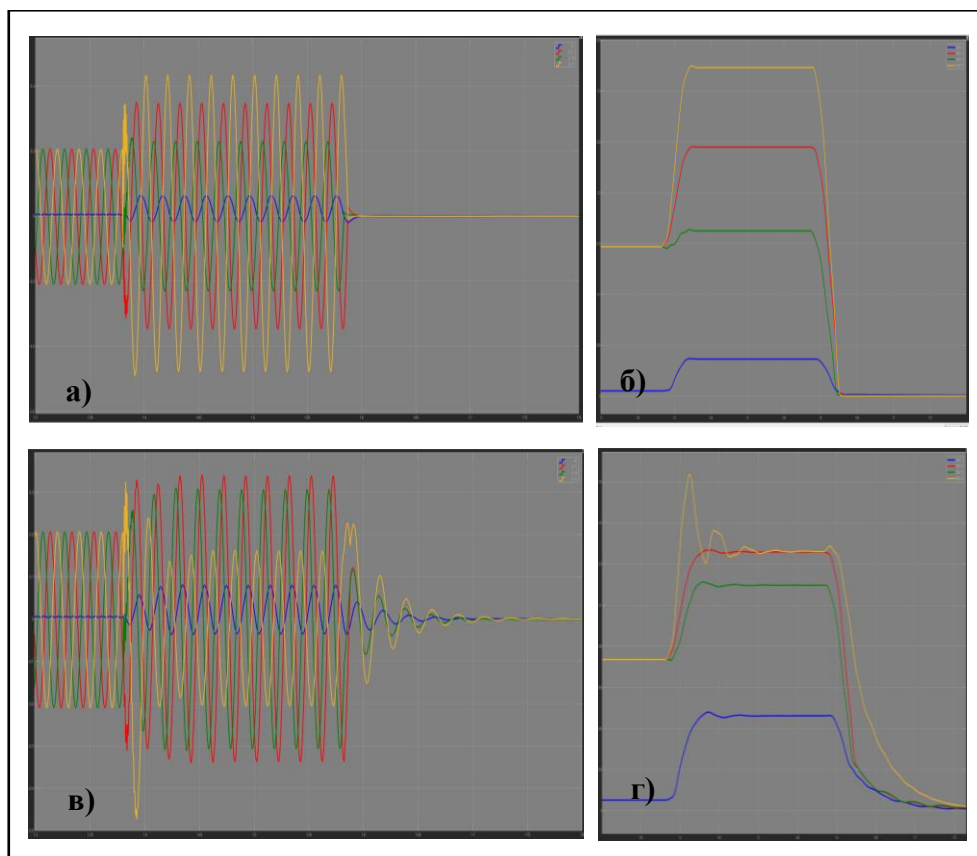


Рисунок 5.5 – Осциллограммы и диаграммы токов утечки в электрической сети с 3VDR-фильтром присоединения УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 1$ мкФ/фазу:

а, б) – компенсатор отключен; в, г) – компенсатор включен

На рисунке 5.6 приведены характерные осциллограммы токов в ветвях 3VDR –фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО.

При емкости изоляции $C_I = 0,5$ мкФ/фазу и отключенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение тока переходного процесса нарастает до установившегося значения $I_y = 193$ мА за $t_{\text{пн1}} = 0,05$ с. При этом количество электричества в цепи утечки за время срабатывания УЗО составляет $Q_{h.c3} = 38,6$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки ток затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{пн2}} = 0,08$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 7,7 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 46,3$ мА·с, что критически близко к допустимому в кратковременном режиме воздействия $Q_{\text{доп}} = 50$ мА·с.

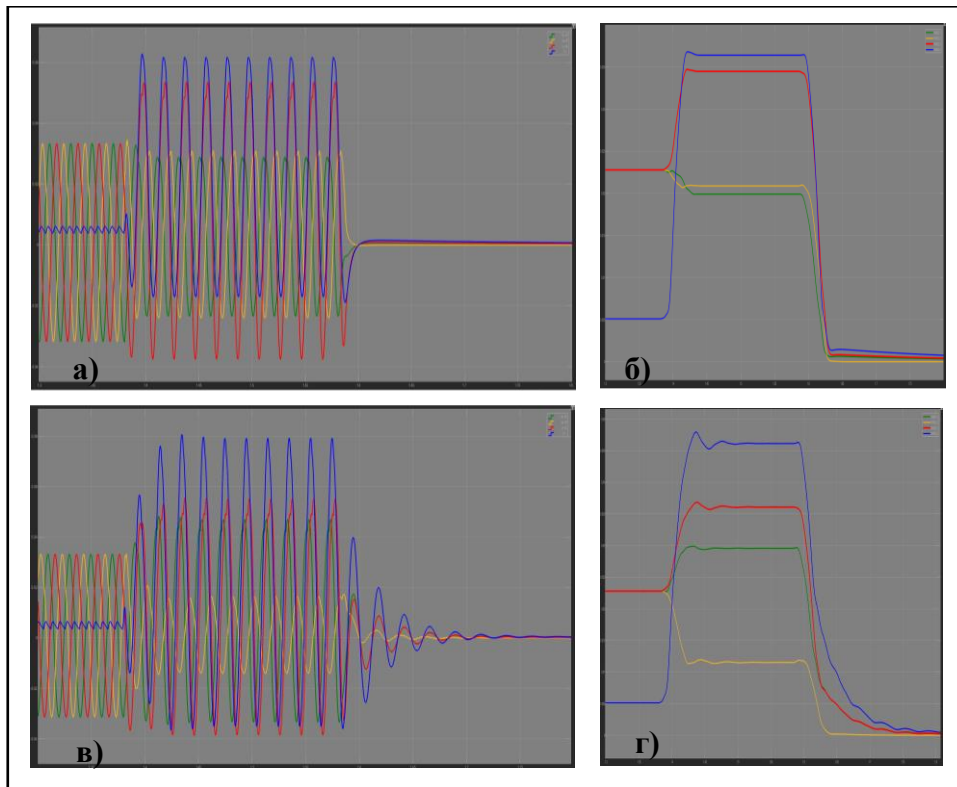


Рисунок 5.6 – Осциллограммы и диаграммы токов в ветвях 3VDR-фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО при $R_I = 180$ кОм/фазу, $C_I = 1$ мкФ/фазу:

а, б) – компенсатор отключен; в, г) – компенсатор включен

При емкости изоляции $C_I = 0,5$ мкФ/фазу и включенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение тока переходного процесса достигает $I_{\text{пн1}} = 163,5$ мА, затухающего до установившегося тока $I_y = 126$ мА за $t_{\text{пн1}} = 0,17$ с, что сопоставимо с временем срабатывания защитного отключения. При этом количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.c3} = 28,9$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки возникает бросок тока до $I_{\text{пн2}} = 129$ мА который затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{пн2}} = 0,15$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 9,7 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 38,6$ мА·с, что меньше допустимого в кратковременном режиме воздействия $Q_{\text{доп}} = 50$ мА.

Степень компенсации с учетом переходного процесса за время срабатывания УЗО составляет 34,7%.

При емкости изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу и отключенном компенсаторе емкостного тока в начальный момент однофазной утечки действующее значение ток переходного процесса от значения $I_{\text{пн1}} = 325$ мА за $t_{\text{пн1}} = 0,05$ с снижается до установившегося $I_y = 323$ мА. При этом количество электричества в цепи утечки за время срабатывания УЗО составляет $Q_{h.c3} = 64,6$ мА·с. После срабатывания УЗО в цепи утечки ток затухает до уровня $I_y = 6$ мА за $t_{\text{пн2}} = 0,05$ с, что добавляет к общему количеству электричества Q_h еще 7,3 мА·с. Суммарное количество электричества в цепи утечки составляет $Q_{h.общ} = 71,9$ мА·с, что превышает значение допустимого в кратковременном режиме воздействия.

За время срабатывания в ветвях фильтра УЗО напряжение в фазах *B* и *C* находится на уровне 565 – 670 В. После отключения автоматического выключателя происходит возрастание тока в ветвях фильтра до 65 мА. Автоколебательный процесс затухания тока имеет продолжительность 0,02 с, т.е. практически отсутствует.

При емкости изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу и включенном компенсаторе емкостного тока показатели тока утечки через изоляцию и в цепях фильтра УЗО, а также временные характеристики переходного процесса в количественном выражении практически совпадают с аналогичными показателями работы компенсатора при емкости изоляции $C_I = 1$ мкФ/фазу.

Степень компенсации с учетом переходного процесса за время срабатывания УЗО составляет 60%.

По сравнению с условиями работы компенсатора с $3RL$ -фильтром УЗО следует отметить, что несмотря на более высокие действительные значения токов утечки длительность переходного процесса несколько меньше (на 0,1 с) и автоколебательный процесс затухания тока носит более устойчивый характер.

При включенном компенсаторе после срабатывания УЗО возникает переходный процесс, в результате которого ток в цепи утечки затухает в течение 0,1 – 0,2 с, что увеличивает время опасного воздействия на человека до 0,3 – 0,4 с. Дроссель компенсатора и емкость изоляции в цепи утечки тока создают

колебательный контур, характеризующийся собственной электромагнитной постоянной времени затухания напряжения и тока в цепи утечки. Использование компенсатора приводит не только к снижению тока утечки (положительный эффект), но и к увеличению времени его воздействия на человека.

При этом подтверждается менее опасный уровень тока утечки для УЗО с активно-индуктивной схемой присоединения к сети.

Анализ осциллограмм подтвердил положение о том, что условия резонанса емкостных токов в различных фазах не совпадают. Бросок тока утечки после срабатывания УЗО, его амплитуда и скорость затухания определяется составляющими некомпенсированных токов в неповрежденных фазах. Таким образом, обоснованным является применение пофазной компенсации емкостного тока утечки.

В таблице 5.1 приведены данные о количестве электричества, протекающего через человека $Q_{h.cз}$ за время срабатывания УЗО ($t_{сз} = 0,2$ с) при несимметрии параметров изоляции фаз $U_F = 660$ В ($R_{IA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) в режимах однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию при равенстве емкостей фаз сети относительно земли ($C_{IA} = C_{IB} = C_{IC}$, мкФ/фазу).

На рисунке 5.7 изображены зоны определения зависимостей тока $I_{h,уст}$ для УЗО с активно-индуктивным фильтром присоединения (1); для УЗО с активно-вентильным фильтром присоединения и включенным компенсатором емкостной составляющей тока утечки, настроенным в резонанс с емкостью 0,5 мкФ (3); для УЗО активно-вентильным фильтром присоединения и отключенным компенсатором (2).

Анализ результатов исследований позволил установить наличие тесной корреляционной связи между параметрами установившегося за время срабатывания УЗО тока $I_{h,уст}$ и электромагнитной составляющей затухания тока утечки в контуре фазной изоляции T_{IH} , которая достаточно точно выражается в виде функции полинома третьей степени. Соответствие экспериментальным

данным оценивалось по относительной ошибке ν (коэффициент вариации) и среднеквадратическому отклонению σ .

Таблица 5.1 – Количество электричества в цепи утечки тока через поврежденную фазу электрической сети за время срабатывания УЗО

R_{IB} , кОм/фазу	R_{IC} , кОм/фазу	$C_{IA} = C_{IB} = C_{IC}$, мкФ/фазу				
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
300	300	8,57	25,1	39,3	50,9	64,2
	180	8,46	24,8	39,0	50,7	63,0
	120	8,27	24,5	38,8	50,4	63,6
	60	7,85	23,7	37,9	49,6	62,9
	31,5	7,65	22,5	36,5	48,1	61,5
	10,5	12,4	20,2	32,1	43,0	56,3
180	300	8,82	25,1	39,4	51,0	64,2
	180	8,64	24,9	39,1	50,6	63,0
	120	8,5	24,6	38,8	50,5	63,6
	60	8,08	23,9	38,0	49,7	63,0
	31,5	7,95	22,6	36,6	48,2	60,8
	10,5	12,6	20,4	32,2	43,1	56,3
120	300	9,07	25,7	37,5	50,9	64,3
	180	8,92	25,1	39,2	50,8	64,1
	120	8,7	24,7	38,8	50,1	63,6
	60	8,4	24,1	38,1	49,77	63,0
	31,5	8,3	22,9	36,7	48,3	61,6
	10,5	13,1	20,8	32,4	43,3	56,4
60	300	9,89	25,8	39,7	51,4	64,5
	180	9,77	25,6	39,6	50,9	63,1
	120	9,7	25,3	39,3	50,9	64,0
	60	9,29	24,4	38,1	49,6	62,7
	31,5	9,48	23,6	37,2	48,7	61,9
	10,5	14,1	21,6	36,0	40,8	56,8
31,5	300	11,5	26,8	41,2	52,0	64,8
	180	11,46	26,7	40,4	51,7	64,6
	120	11,4	26,4	40,1	51,5	64,3
	60	11,3	25,8	39,4	50,6	63,7
	31,5	11,2	24,3	37,2	48,4	61,4
	10,5	15,9	23,3	34,4	40,9	57,4
10,5	300	19,2	31,8	44,2	54,6	66,7
	180	19,2	31,8	43,8	54,6	66,7
	120	19,2	31,7	43,7	54,2	66,4
	60	19,4	31,2	43,2	53,5	65,6
	31,5	19,8	32,2	42,3	52,3	64,9

Для реле типа АЗУР с отключенным автоматическим компенсатором ток через человека определится по формуле:

$$I_{h,уст} = 283,82 - 29,3 \cdot T_{IH} + 1,1 \cdot T_{IH}^2 + 0,013 \cdot T_{IH}^3; \quad (5.1)$$

Для реле типа УАКИ с отключенным автоматическим компенсатором ток через человека определится по формуле:

$$I_{h,уст} = 201,65 - 27,64 \cdot T_{IH} + 1,51 \cdot T_{IH}^2 - 0,025 \cdot T_{IH}^3; \quad (5.2)$$

Для реле типа УАКИ с компенсирующим дросселем, включенным в резонанс с емкостью изоляции 0,5 мкФ/фазу, ток через человека определится по формуле:

$$I_{h,уст} = 165,7 - 29,5 \cdot T_{IH} + 2,07 \cdot T_{IH}^2 - 0,039 \cdot T_{IH}^3. \quad (5.3)$$

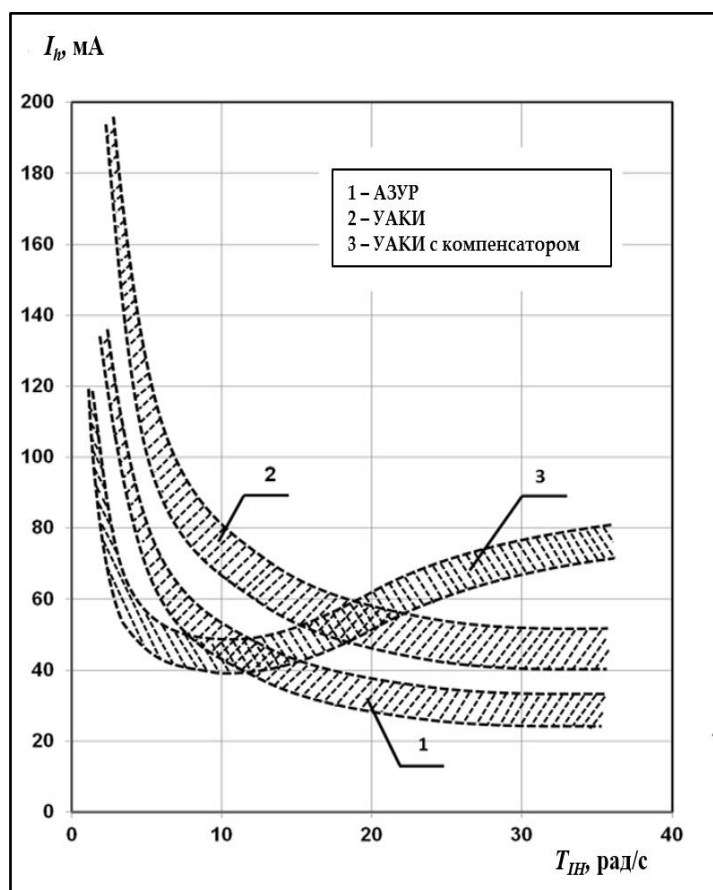


Рисунок 5.7 – Зоны определения функции $I_{h,уст} = f(T_{IH})$ для УЗО

На основании изложенного сделаны следующие выводы:

– при оценке опасности поражения токами утечки необходимо учитывать тип УЗО и время срабатывания защиты;

– использование быстродействующих защит ($t_{сз} < 0,1$ с) с устройством автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки позволяет ограничить как длительность опасного воздействия, так и величину тока, проходящего через человека в установившемся режиме утечки.

5.3. Исследование переходных процессов цепях утечки тока в режиме генерирования электродвигателями обратной ЭДС

Целью исследования являлось математическое моделирование и анализ режимов генерирования обратной ЭДС после отключения участка сети с электродвигателем от питающего трансформатора устройством защиты.

Количество электричества определялось по действующим значениям тока утечки $I_{h,t}$ за заданный интервал времени Δt .

Параметры изоляции изменялись в диапазоне $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ/фазу, $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу. Мощность двигателей изменялась в диапазоне $P_{дв} = 30 - 160$ кВт, при фазном напряжении сети $U_F = 660$ В. Постоянная времени затухания электромагнитных колебаний в контуре, образованном сопротивлением и емкостью изоляции сети, с учетом сопротивления тела человека, определялась по формуле:

$$T_{IH} = \frac{R_h + R_I}{\omega C_I R_h R_I}. \quad (5.4)$$

Визуализация и верификация результатов моделирования осуществлялась на имитационной модели для исследования режимов утечки в сети с асинхронным электродвигателем, приведенной на рисунке 5.8.

На рисунках 5.9 и 5.10 приведены характерные осциллограммы полного тока утечки через человека, прикоснувшегося к фазе А, а также фазные напряжения в цепях однофазной утечки тока и напряжение смещения нейтрали.

На модели имитировался режим однофазной утечки тока в сети с фазным напряжением $U_F = 660$ В и электродвигателем мощностью 45 кВт. В исходном симметричном режиме сопротивления и емкости фаз сети относительно земли принимались равными $R_I = 120$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу). Однофазная

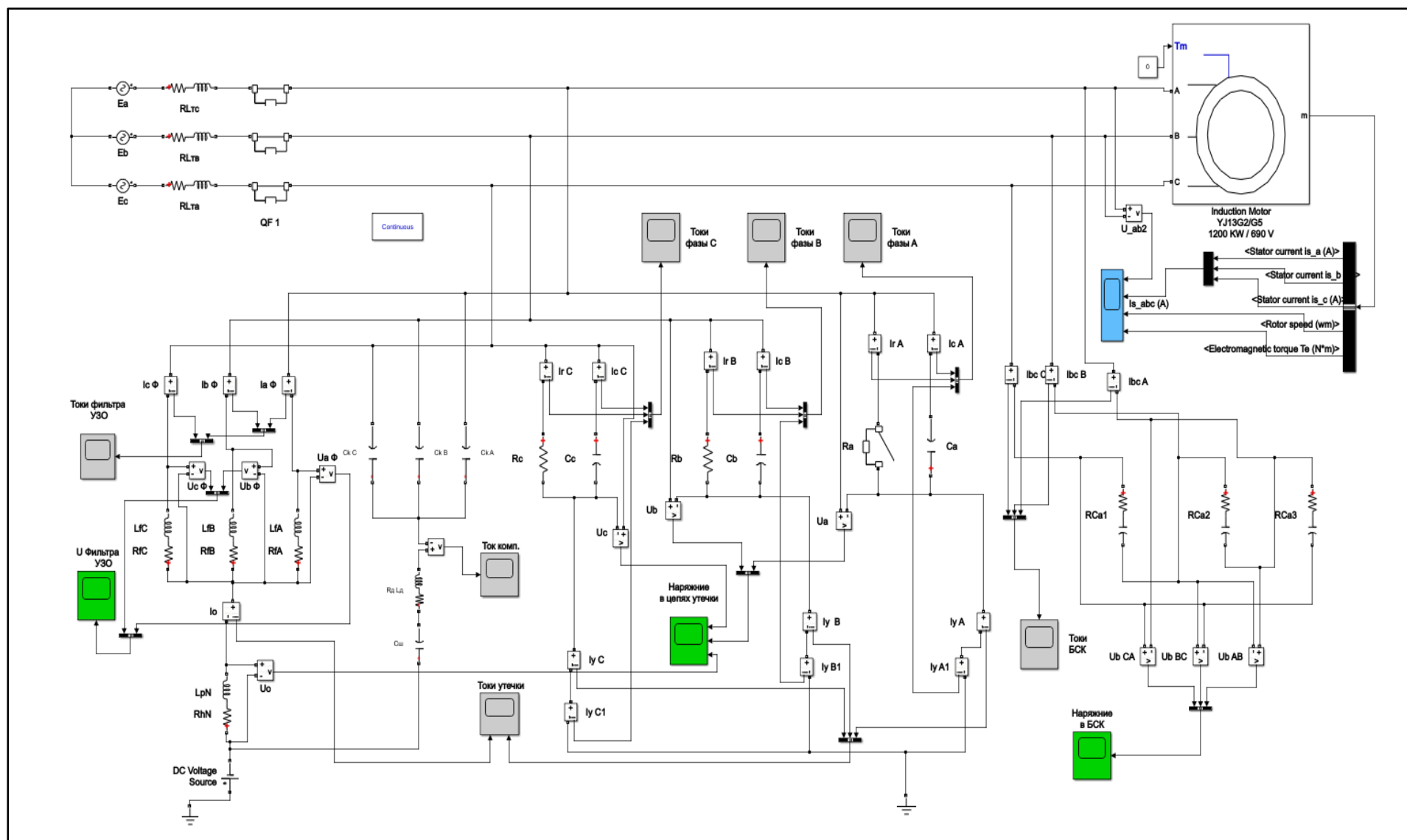


Рисунок 5.8 – Имитационная модель для исследования режимов утечки в сети с асинхронным электродвигателем

утечка тока моделировалась включением в фазу А сопротивления $R_h = 1$ кОм, имитирующего прикосновение человека к токоведущей части электроустановки.

Время срабатывания УЗО с активно-индуктивным фильтром задавалось равным 0,2 с. Время генерирования обратной ЭДС при снижении тока до длительно допустимого значения $I_{дл.доп} = 6$ мА принималось равным 2 с.

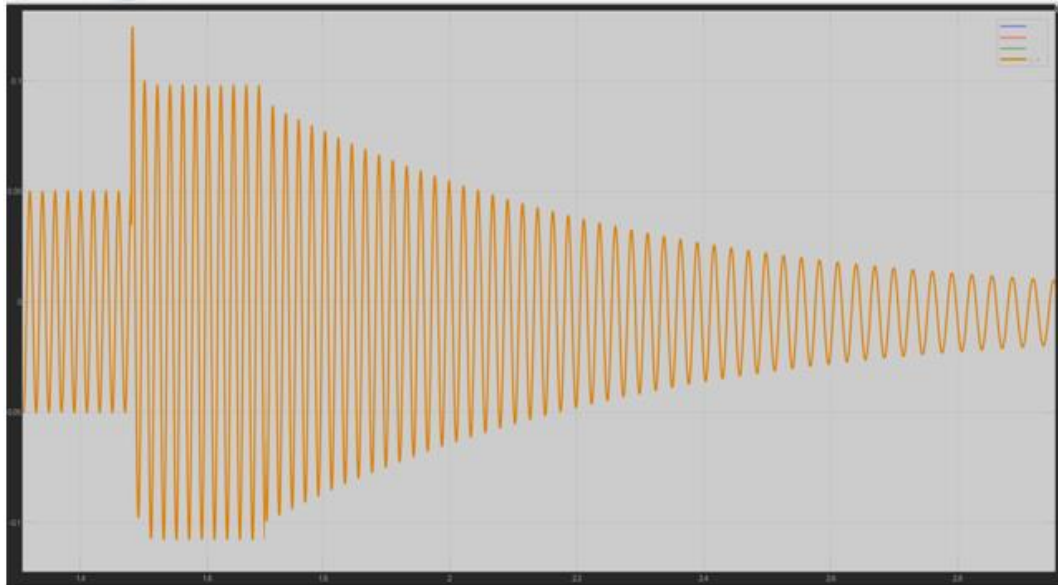


Рисунок 5.9 – Полный ток утечки через человека, прикоснувшегося к фазе А
($U_F = 660$ В; $R_I = 120$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу)

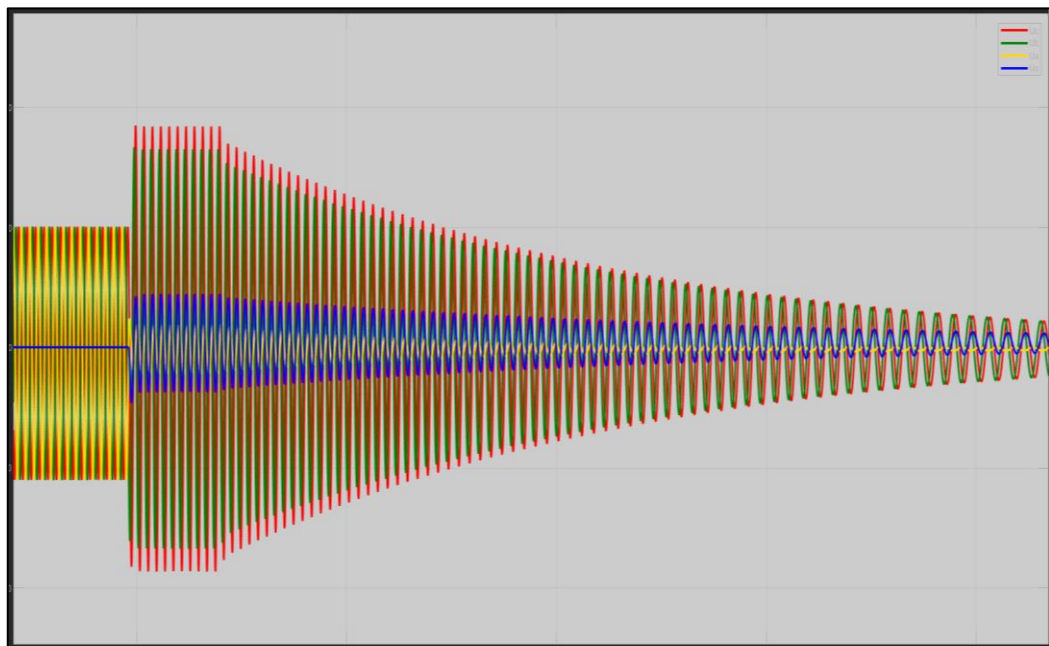


Рисунок 5.10 – Фазные напряжения в цепях однофазной утечки тока
и напряжение смещения нейтрали

Анализ осциллограмм показал их полную идентичность процессу срабатывания защиты и переходу электродвигателя в режим генерирования обратной ЭДС, а также результатам аналитических и экспериментальных исследований.

На рисунках 5.11 и 5.12 приведены токи утечки в фазах и в цепи измерителя УЗО, а также фазные напряжения в цепях двухфазной утечки тока и напряжение смещения нейтрали. Исходным являлся режим несимметрии активного сопротивления изоляции ($R_A = 120$ кОм/фазу, $R_B = R_C = 12$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу).

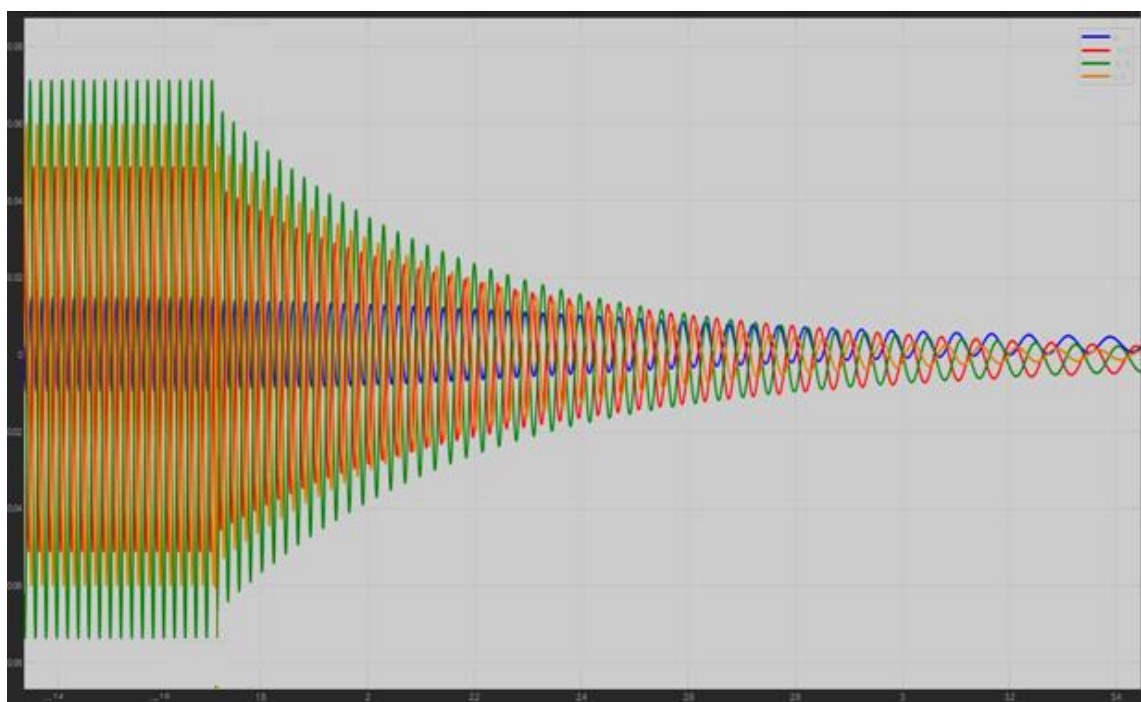


Рисунок 5.11 – Режим двухфазной утечки. Токи утечки в фазах и в цепи измерителя УЗО ($R_A = 120$ кОм/фазу, $R_B = R_C = 12$ кОм/фазу $C_I = 0,3$ мкФ/фазу)

Анализ осциллограмм показал их полную идентичность режиму несимметрии фазной изоляции, анализ которого выполнен в третьей главе диссертации. При этом установлен факт того, что интенсивность затухания напряжения смещения нейтрали и тока в цепи измерителя УЗО значительно ниже, чем у фазных напряжений сети относительно земли.

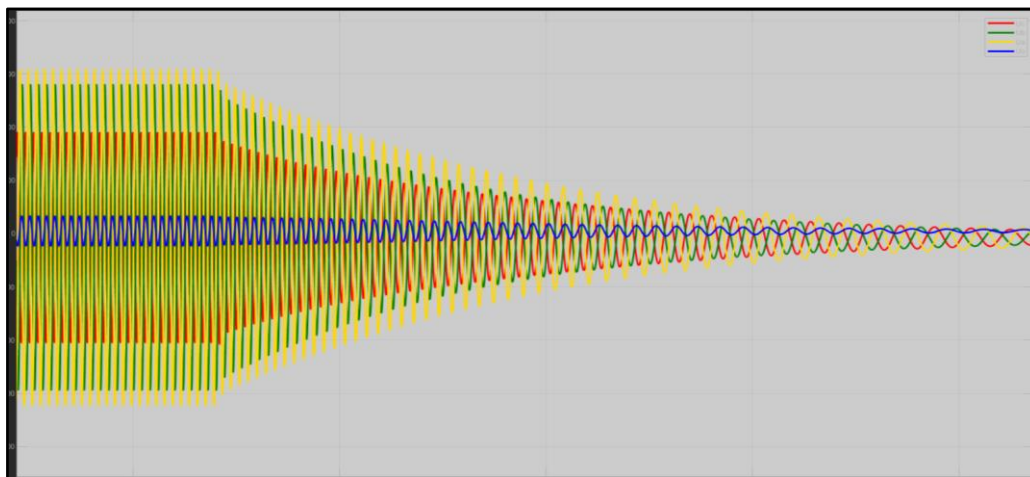


Рисунок 5.12 – Фазные напряжения в цепях двухфазной утечки тока и напряжение смещения нейтрали

На интенсивность затухания в значительной степени оказывает влияние наличие стопорного (фрикционного) тормоза на валу приводного механизма.

На рисунке 5.13 приведены характерные осциллограммы фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали при различных значениях фрикционной нагрузки.

Результаты аналитического исследования режимов утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателями мощностью 30 – 160 кВт приведены в приложении П1 (таблицы П1.8 – П1.12).

Анализ 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 $Q_h > Q_{\text{доп}} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$. Длительность протекания тока I_h , превышающего допустимый уровень 6 мА, составляет от 1,13 с до 1,48 с при емкости $C_I > 0,3 \text{ мкФ/фазу}$. Начальное значение тока через человека в зависимости от уровня активного и емкостного сопротивлений изоляции изменяется в диапазоне $I_h = 61,1 - 599 \text{ мА}$.

Характер изменения T_{IH} и Q_h позволяет предположить наличие тесной корреляционной связи и обратно пропорциональную зависимость между указанными параметрами.

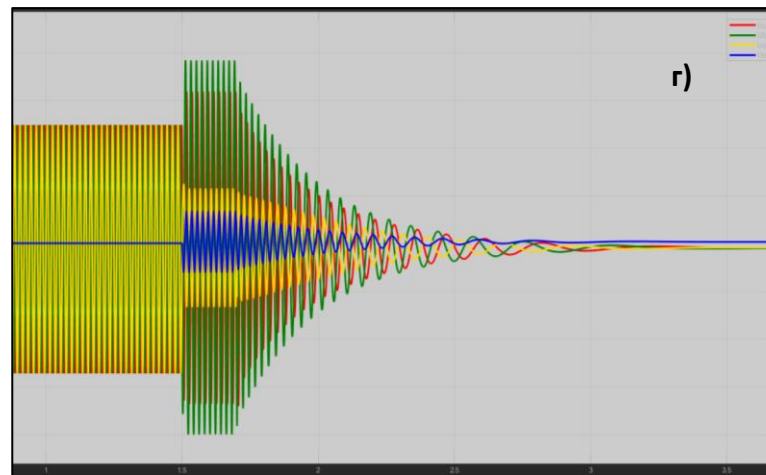
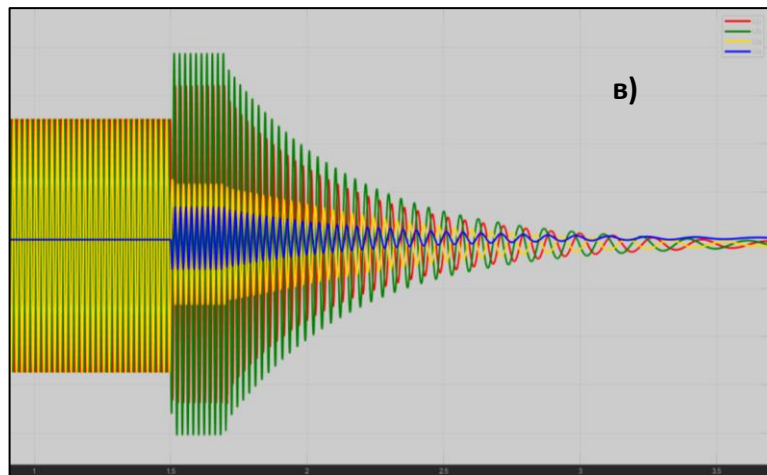
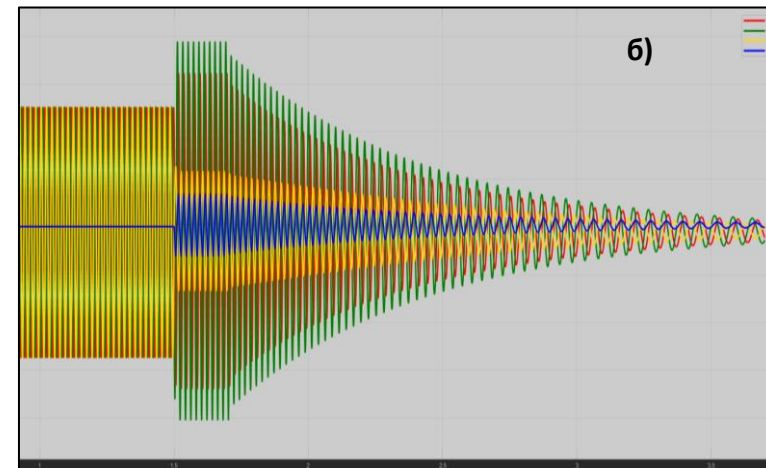
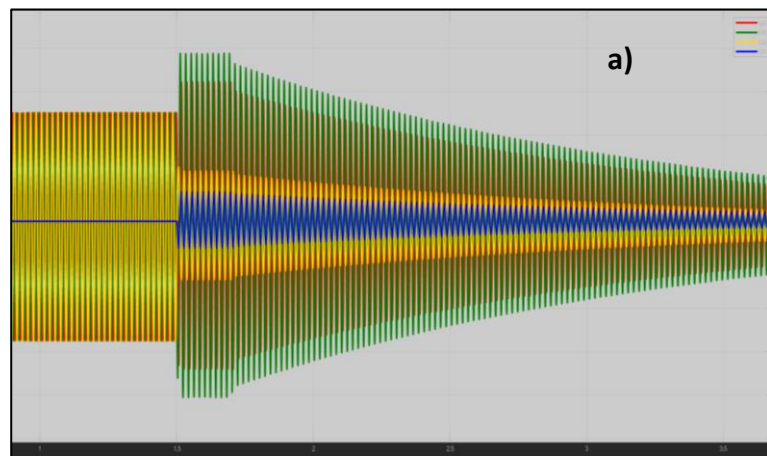


Рисунок 5.13 – Характерные осциллограммы фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали при изменении фрикционной нагрузки: а) $F_{FR} = 0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$; б) $F_{FR} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$; в) $F_{FR} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$; г) $F_{FR} = 70 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Анализ результатов моделирования показал, что электродвигатели мощностью менее 45 кВт в режиме «свободного выбега» представляют реальную опасность для человека.

Характерные зависимости $i_h = f(t_b)$ для электродвигателей, имеющих различные постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в роторе, приведены на рисунке 5.14.

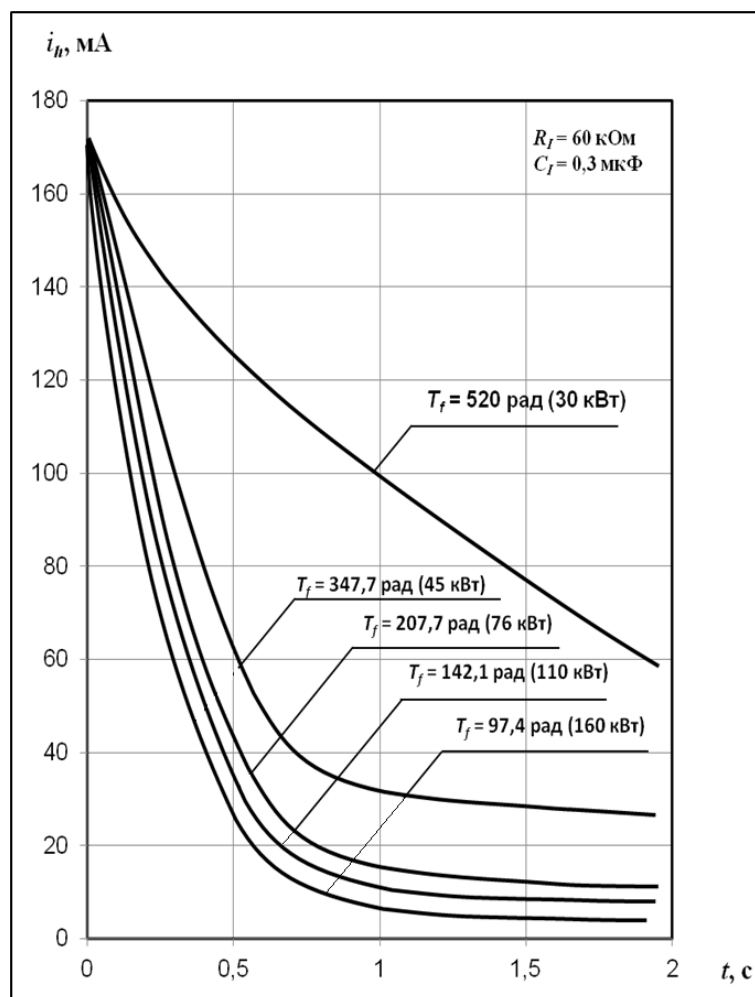


Рисунок 5.14 – Зависимости $i_h = f(t_b)$ для двигателей мощностью 30 – 160 кВт, имеющих приведенные к синхронной скорости электромагнитные постоянные $T_f = 94,7 – 520$ рад

Как следует из графиков, зависимость $i_h = f(t_b)$ имеет нелинейный характер. Интенсивность затухания тока I_h при постоянстве параметров изоляции сети в основном определяется величиной T_f .

Для двигателей мощностью менее 45 кВт характер изменения тока утечки в режиме генерирования обратной ЭДС значительно отличается от выбега более мощных электродвигателей. Существование остаточного напряжения затягивается на более длительный период времени (более 2,5 с). Количество электричества, проходящего через человека, достигает $Q_h = 150 \text{ мА}\cdot\text{с}$.

Таким образом, электродвигатели, имеющие относительно небольшую мощность, но более высокие значения постоянной времени T_f , малые значения постоянной инерции ротора T_J и момента сопротивления на валу двигателя M_B , способны генерировать обратную ЭДС при которой значения токов и количество электричества в цепи утечки значительно превышают допустимые уровни.

В результате математического моделирования были получены зависимости $Q_h = f(T_{IH})$ и $Q_h = f(T_f)$ изображенные на рисунках 5.15 и 5.16.

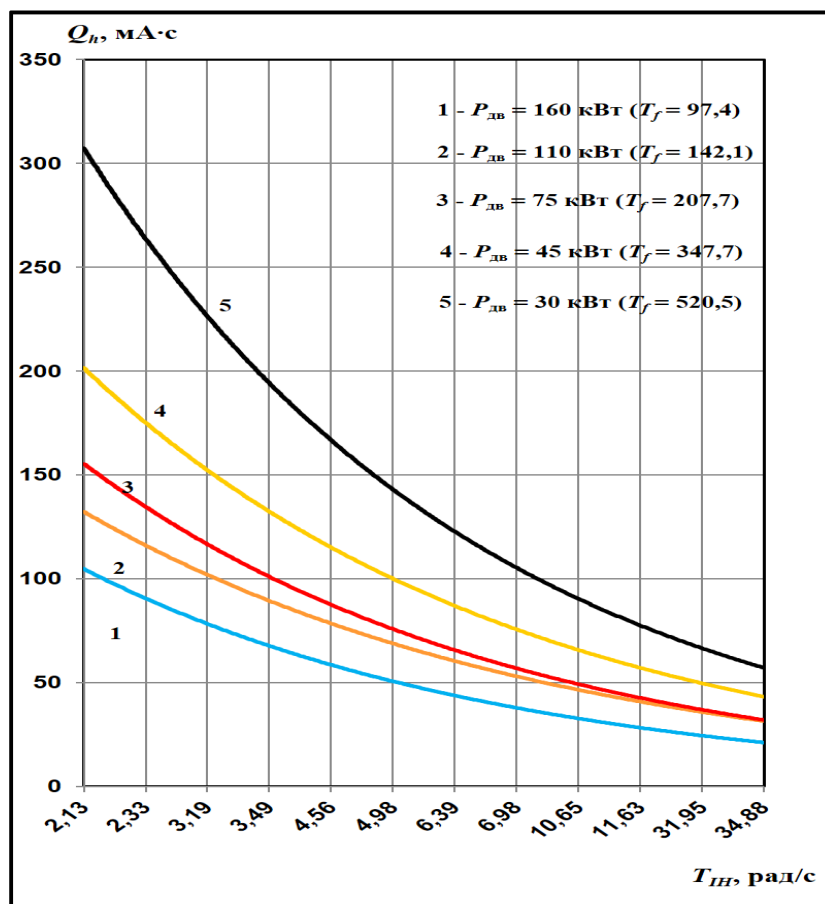


Рисунок 5.8 – Зависимости $Q_h = f(T_{IH})$, при $T_f = const$

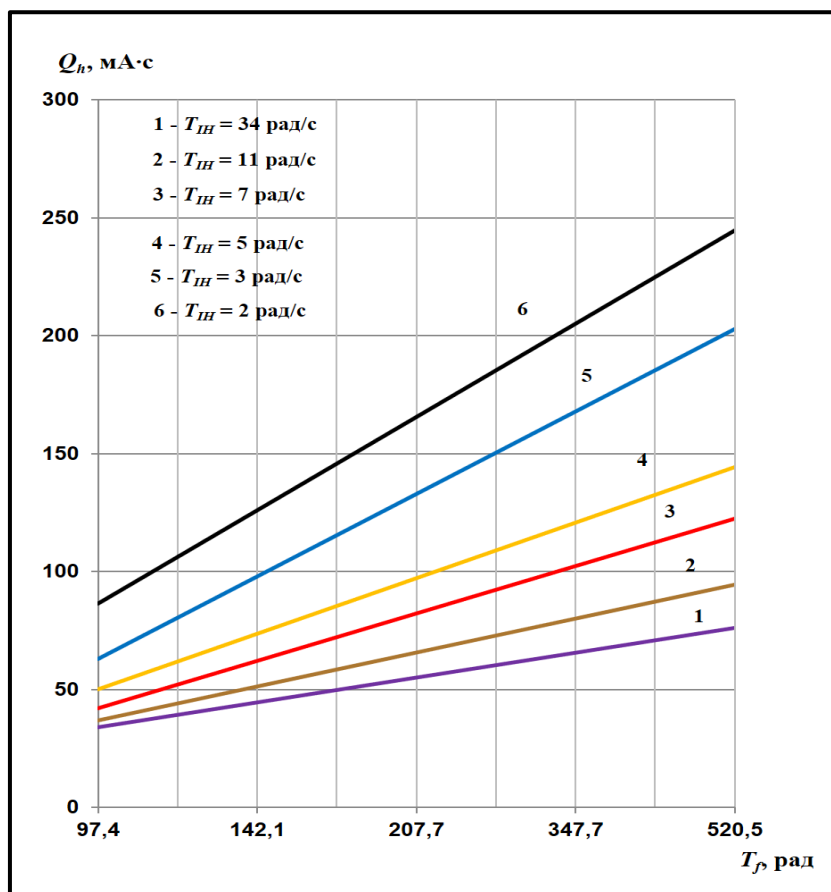


Рисунок 5.9 – Зависимости $Q_h = f(T_f)$, при $T_{IH} = const$

Корреляционный анализ представленных зависимостей показал наличие достаточно тесной связи между количеством электричества Q_h и факторами T_{IH} и T_f . При этом зависимости $Q_h = f(T_{IH})$, при $T_f = const$ имеют нелинейную (гиперболическую) форму, а зависимости $Q_h = f(T_f)$ при $T_{IH} = const$ – линейную.

Анализ показал, что электродвигатели мощностью менее 45 кВт генерируют за 1 секунду количество электричества, превышающее допустимое значение 50 мА·с, при любом значении постоянной затухания электромагнитных колебаний T_{IH} контура, образованного сопротивлениями изоляции и тела человека. При этом для человека опасность поражения токами, при генерировании обратной ЭДС электродвигателями мощностью более 45 кВт появляется лишь при значениях $T_{IH} \leq 10$ рад/с, что соответствует значениям $C_I > 0,3$ мкФ/фазу и $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу.

В результате анализа получены уравнения регрессии, характеризующие режим генерирования обратной ЭДС, представленные в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Зависимости $Q_h = f(T_{IH})$ в режиме генерирования отключаемым электродвигателем обратной ЭДС

$P_{ов}, \text{кВт}$	$T_f, \text{рад}$	$Q_h, \text{мА} \cdot \text{с}$	R_Q^2
160	97,4	$Q_h = 19,46 + \frac{170,6}{T_{IH}}$	0,84
110	142,1	$Q_h = 27,13 + \frac{219,4}{T_{IH}}$	0,83
75	207,7	$Q_h = 29,54 + \frac{253,7}{T_{IH}}$	0,83
45	347,7	$Q_h = 37,4 + \frac{337,4}{T_{IH}}$	0,82
30	520,5	$Q_h = 53,2 + \frac{486,6}{T_{IH}}$	0,8

Наличие тесной связи между количеством электричества Q_h и факторами T_{IH} и T_f позволило сделать вывод о возможности описания исследуемого режима при помощи уравнения множественной регрессии. Для учета обратной нелинейной зависимости $Q_h = f(T_{IH})$ необходимо фактор T_{IH} представить в соответствующем виде $1/T_{IH}$. Результаты корреляционного анализа приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.3– Зависимости $Q_h = f(T_f)$ в режиме генерирования отключаемым электродвигателем обратной ЭДС

$T_{IH}, \text{рад/с}$	$Q_h, \text{мА} \cdot \text{с}$	R^2
34	$Q_h = 19,87 + 0,068 \cdot T_f$	0,87
11	$Q_h = 21,77 + 0,131 \cdot T_f$	0,86
7	$Q_h = 28,55 + 0,988 \cdot T_f$	0,83
5	$Q_h = 35,06 + 0,2488 \cdot T_f$	0,83
3	$Q_h = 45,94 + 0,311 \cdot T_f$	0,87
2	$Q_h = 62,2 + 0,365 \cdot T_f$	0,85

Таблица 5.4– Результаты корреляционного анализа зависимости $Q_h = f(T_f, T_{IH})$

Совокупный коэффициент множественной корреляции	$R_{Q_h T_{IH} T_f}$	0,91
Коэффициент корреляции между Q_h и T_h при элиминировании фактора T_f	$R_{Q_h T_{IH} \cdot T_f}$	0,81
Коэффициент корреляции между Q_h и T_f при элиминировании фактора T_h	$R_{Q_h T_f \cdot T_{IH}}$	0,82
Коэффициент парной корреляции между Q_h и T_h	$R_{Q_h T_{IH}}$	−0,67
Коэффициент парной корреляции между Q_h и T_f	$R_{Q_h T_f}$	0,71
Коэффициент парной корреляции между T_h и T_f	$R_{T_{IH} T_f}$	0,03
Корреляционное соотношение	η	0,86
Коэффициент множественной детерминации	R^2	0,83
Коэффициент вариации	ν	2,33

Уравнение, характеризующее количество электричества, проходящего через человека в режиме генерирования обратной ЭДС, запишется в виде:

$$Q_h = 64,13 + 0,238 \cdot T_f - 2,87 \cdot T_{IH}. \quad (5.5)$$

Линейная математическая модель представлена на рисунке 5.10.

Квадратическая модель:

$$Q_h = 96,34 + 0,28 \cdot T_{IH} - 11,9 \cdot T_f + 3,96 \cdot T_{IH}^2 - 0,008 \cdot T_{IH} \cdot T_f + 0,33 \cdot T_f^2, \quad (5.6)$$

представлена на рисунке 5.11.

Наиболее точной представляется модель, полученная методом наименьших квадратов:

$$Q_h = 12,4 + 0,063 \cdot T_f + 268 / T_{IH}. \quad (5.7)$$

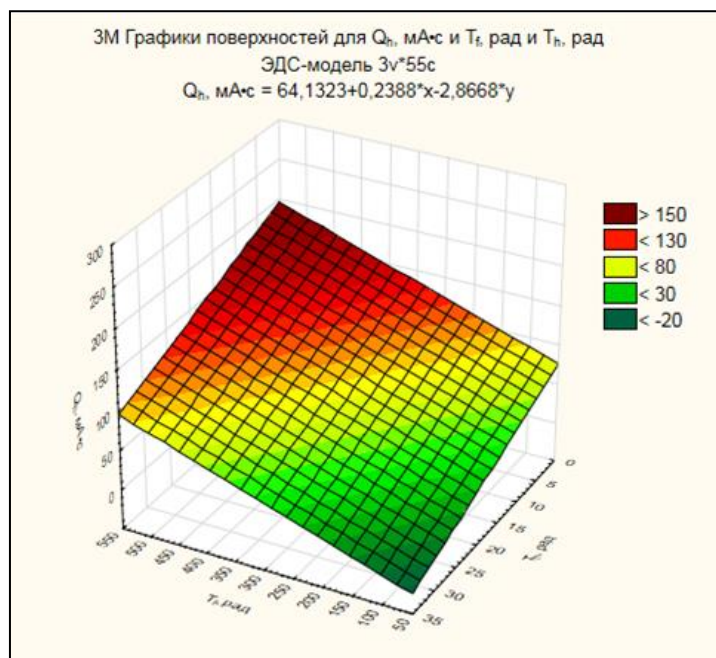


Рисунок 5.10 – Линейная 3М- модель для определения количества электричества Q_h в цепи утечки тока через человека

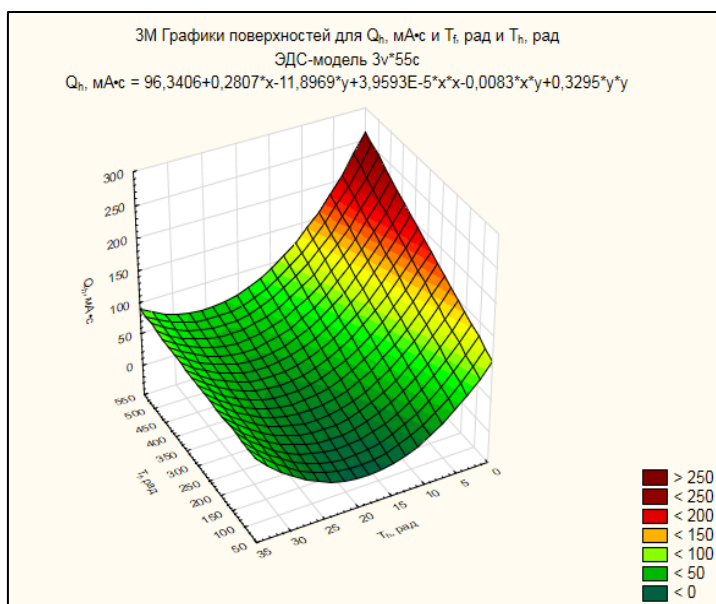


Рисунок 5.11 – Линейная 3М- модель для определения количества электричества Q_h в цепи утечки тока через человека

Таким образом, в результате корреляционного анализа установлена взаимосвязь между параметрами, характеризующими опасность поражения человека электрическим током при генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

5.4. Методика и алгоритм расчета токов утечки в подземной электрической сети

Методика предназначена для расчета участковой электрической сети с учетом режимов утечки тока через изоляцию при проектировании системы электроснабжения шахты.

Исходными данными для расчета являются:

- принятая схема распределения электроэнергии по участку;
- количество, тип и мощность установленных электродвигателей;
- длины и сечения кабельных линий;
- наличие конденсаторных установок и вид компенсации реактивной мощности (групповая, индивидуальная);
- тип устройства защитного отключения УЗО.

Составляется однолинейная расчетная схема электроснабжения (рисунок 5.12), на которую наносятся условные обозначения электроустановок, установленная мощность электродвигателей, длина и сечение кабельных линий и т.д.

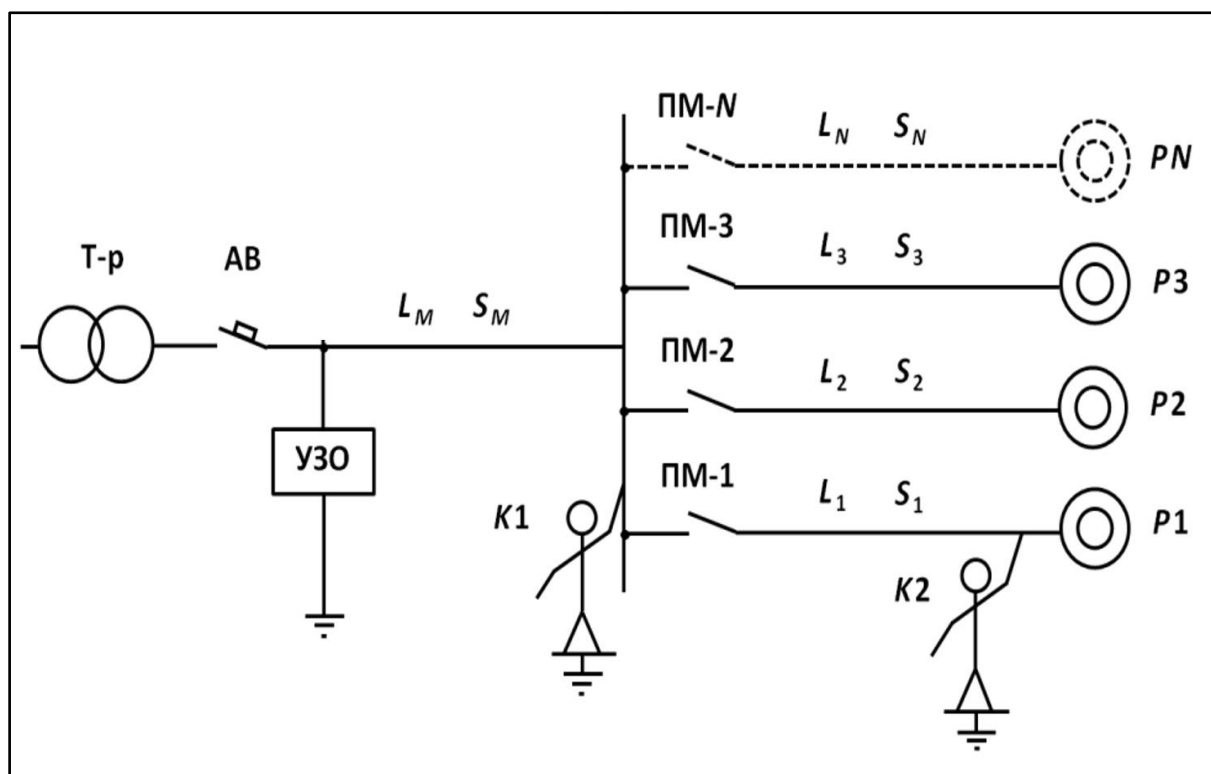


Рисунок 5.12 – Расчетная схема участковой электрической сети

На схеме приняты следующие обозначения:

L_1, L_2, \dots, L_N – длины кабельных линий на ответвлениях от распределительного пункта низкого напряжения до соответствующих электродвигателей, м;

S_1, S_2, \dots, S_N – сечения кабельных линий, мм²;

L_M, S_M – соответственно длина и сечение магистральной кабельной линии, м, мм²;

P_1, P_2, \dots, P_N – установленная мощность электродвигателей, кВт.

На схеме также указывается тип УЗО, автоматических выключателей (АВ), магнитных пускателей (П1, П2, П3, ПN), а также место подключения и тип конденсаторной установки (КУ).

Определяются двигатели, работающие в режимах вентилятора или холостого хода, и прогнозируются возможные места прикосновения человека к фазе электрической сети, в которых наиболее высока вероятность поражения токами переходных процессов (точки $K1, K2$ на рисунке 5.12).

Для заданных мощностей электродвигателей P_i определяются соответствующие постоянные времени ротора:

$$T_{fi} = -0,28 + \frac{15722}{P_{\text{ном.}i}}. \quad (5.8)$$

Эквивалентная постоянная времени затухания обратной ЭДС для группы одновременно работающих электродвигателей:

$$T_f = \frac{\sum_{i=1}^N P_{\text{ном.}i}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_{\text{ном.}i}}{T_{fi}} \right)}, \text{ рад.} \quad (5.9)$$

Емкость изоляции кабельных линий рассчитывается по формулам:

$$C_{Li} = 1,05 \cdot c_{0i} L_i; \quad C_{\Sigma I} = C_{\text{МК}} + \sum_{i=1}^N C_{Li}, \text{ мкФ}, \quad (5.10)$$

где c_{0i} – средняя удельная емкость i -ой кабельной линии, мкФ/м (таблица 5.5); L_i – длина i -ой кабельной линии, м; $C_{\Sigma I}$ – емкость изоляции сети относительно земли с учетом емкости магистрального кабеля $C_{\text{МК}}$, мкФ; C_{Li} – емкость изоляции i -го кабеля, мкФ.

Активное сопротивление изоляции сети относительно земли в зависимости от количества и типа присоединенного электрооборудования:

$$R_I = \frac{10^3}{\frac{n_D}{R_D} + \frac{n_A}{R_A} + \frac{n_T}{R_T} + \frac{n_K}{R_K}}, \text{ кОм}, \quad (5.11)$$

где n_D – количество двигателей на участке; R_D – сопротивление изоляции двигателей, МОм; n_A – количество электрических аппаратов, включая аппараты, встроенные в передвижные станции; R_A – сопротивление изоляции электрических аппаратов, МОм; n_T – количество силовых трансформаторов на участке; R_T – сопротивление изоляции силовых трансформаторов, МОм; n_K – количество кабелей на участке (бронированных и гибких); R_K – активное сопротивление изоляции кабельных линий, МОм.

Таблица 5.5 – Средние величины удельной емкости изоляции сети

Тип кабеля	c_0 (мкФ/км) при сечении кабеля, мм ²							
	6	10	16	25	35	50	70	95
бронированный до 1кВ	0,12	0,17	0,18	0,19	0,24	0,34	0,35	0,36
гибкий неэкранированных до 1 кВ	0,17	0,18	0,19	0,2	0,23	0,24	0,25	0,26
гибкий экранированный до 1 кВ	0,32	0,37	0,43	0,63	0,66	0,7	0,73	0,75

Эквивалентная постоянная времени затухания колебаний в контуре, образованном сопротивлением изоляции сети и цепи утечки, для каждой кабельной линии определится по формуле (5.4).

Для заданного типа УЗО определяется величина тока, проходящего через цепь утечки, в установившемся режиме в зависимости от величины постоянной времени T_Σ , по формулам (5.1) – (5.3).

Для среднего значения времени срабатывания УЗО и отключения автоматического выключателя $t_{сз}$ по величине тока $I_{h,уст}$ определяется количество электричества $Q_{h,сз}$, генерируемого в цепь утечки:

$$Q_h = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{h,уст} t_{сз}. \quad (5.12)$$

Время воздействия токов при генерировании обратной ЭДС для группового режима генерирования:

$$t_{в,гр} = 0,95 - 0,203 \cdot T_{IH} - 0,949 \cdot T_f, \text{ с.} \quad (5.13)$$

Количество электричества, проходящее через цепь утечки:

$$Q_{в,гр} = -5,38 - 4,478 \cdot T_{IH} + 45,559 \cdot t_{в,гр}, \text{ мА} \cdot \text{с.} \quad (5.14)$$

Полное количество электричества и время утечки при генерировании обратной ЭДС отключаемыми двигателями:

$$Q_{h.эдс} = -30,803 - 0,653 \cdot T_{IH} - 36,652 \cdot t_{эдс}, \text{ мА} \cdot \text{с;} \quad (5.15)$$

$$t_{эдс} = 4,507 - 0,01 \cdot T_{IH} - 0,009 \cdot T_f, \text{ с.} \quad (5.16)$$

или по формулам (5.5 – 5.7).

Полное количество электричества через цепь утечки тока сравнивается с допустимой величиной по условию:

$$Q_h = Q_{h.сз} + Q_{h.эдс} \leq Q_{доп}. \quad (5.17)$$

При выполнении данного условия участковую сеть можно считать соответствующей требуемому уровню электробезопасности.

Для реализации методики разработан алгоритм расчета и составлена программа. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 5.13.

В процессе вычислений основных параметров сети и исходных величин, в случае невыполнения заданных условий, возможно внести корректировку в исходные данные с целью уточнения расчета и достижения удовлетворительного результата.

При определении емкости изоляции кабельных линий производится сравнение общей емкости по соотношению:

$$C_I \leq 1,0 \text{ мкФ/фазу.}$$

В случае выполнения данного условия расчет продолжается, если нет – участковая сеть должна быть ограничена по протяженности кабельных линий или разукрупнена нагрузка; программа запрашивает у пользователя необходимую коррекцию данных. Аналогично при расчете величины активного сопротивления

изоляции продолжение работы программы осуществляется при выполнении условия:

$$R_I \geq 1,1 \cdot R_{кр},$$

где $R_{кр}$ – критическое сопротивление изоляции ($R_{кр} = 30$ кОм/фазу).

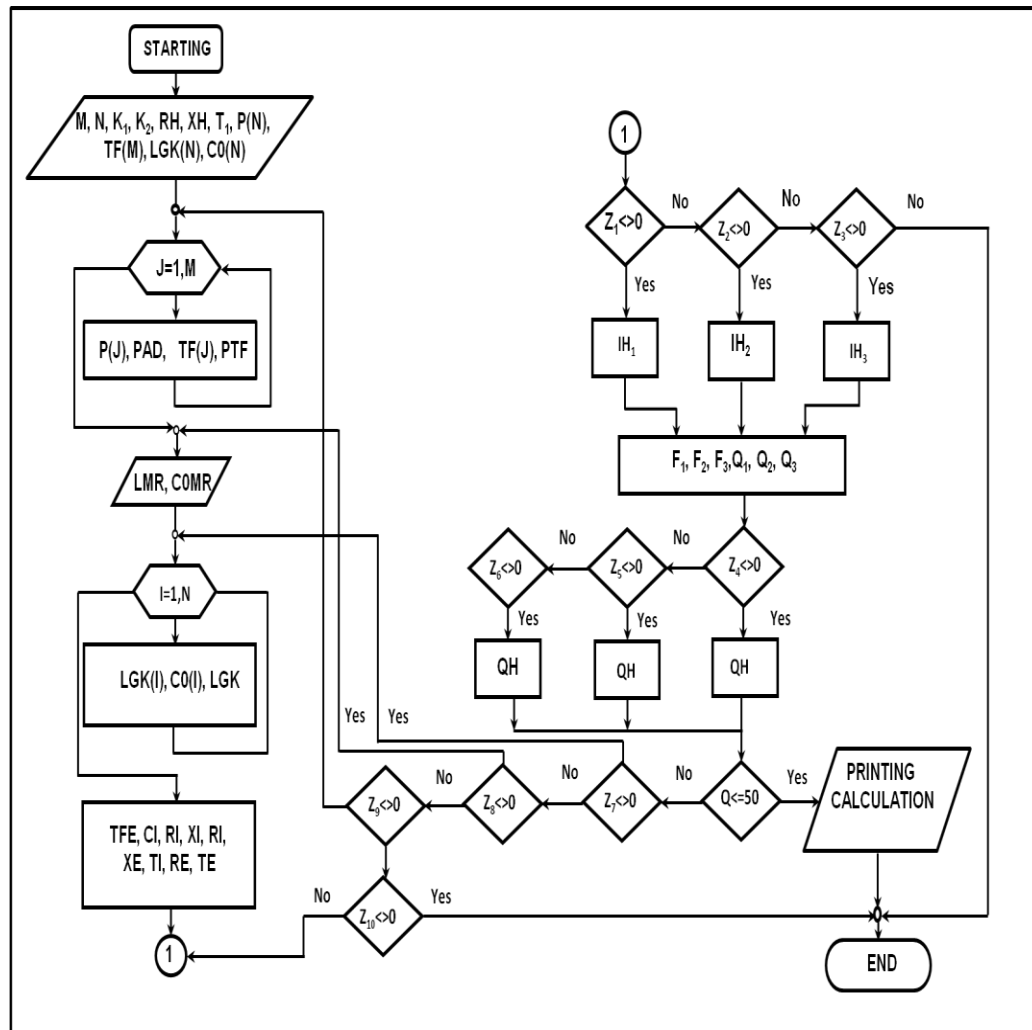


Рисунок 5.13 – Блок-схема алгоритма расчета режима утечки тока

В случае невыполнения его, программа запрашивает необходимость замены типа УЗО или использования компенсации емкостной составляющей тока утечки.

Основной режим диалога начинается при определении полного количества электричества через цепь утечки Q_h . В соответствии с принятым случаем утечки тока на участке сети идет запрос о месте утечки (магистраль, ответвление) и особенностях сети (тип УЗО, наличие конденсаторных установок и т.д.). По рассчитанной величине Q_h определяют соответствие условиям электробезопасности по критерию $Q_h \leq 50$ мА·с. В случае невыполнения данного

условия программа вновь переходит в режим диалога, запрашивая пользователя с целью внесения корректировки в исходные данные.

Программа позволяет произвести расчет режимов утечки тока как для отдельных электродвигателей, так и для группы одновременно работающих машин, а также определить возможность применения конденсаторных установок для групповой и индивидуальной компенсации реактивной мощности, обеспечивая при этом необходимый уровень электробезопасности, причем рассматриваются только режимы вентилятора и холостого хода, когда влияние генерируемой ЭДС наиболее существенно.

Программа может быть использована при выполнении проектно-конструкторских работ для прогнозирования состояния изоляции электрической сети и оценки опасности электротравматизма.

Программа позволяет определить необходимость применения дополнительных защитных мероприятий по ограничению влияния режимов утечки тока.

5.5. Экспериментальные исследования переходных процессов в подземных электрических сетях

Стендовые исследования режимов утечки тока

Для проведения экспериментальных исследований по определению параметров сопротивления изоляции фаз сети относительно земли разработан испытательный стенд, в работу которого положен способ пофазного контроля.

Испытательный стенд состоит из источника питания, в качестве которого используется вторичная обмотка трансформатора, фильтра нулевой последовательности, образованного активными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , токоограничивающего элемента — R_0 и регистрирующих приборов (вольтметры, фазометр). Параметры изоляции моделируются магазинами переменных сопротивлений и емкостей.

На рисунке 5.14 приведена принципиальная схема стенда, с помощью которого определялись зависимости изменения величин токов и их фаз в

измерительной цепи от параметров изоляции, состоящего из отдельных функциональных блоков – блока питания 1, измерительного блока 2, блоков 3 (активного) и 4 (емкостного) сопротивлений изоляции, блока измерительных приборов 5.

Блок питания 1 включается с помощью разъединителя QS_1 , посредством которого подается напряжение на первичную обмотку трансформатора T . Вторичная обмотка трансформатора имеет несколько отпаяк на различные напряжения. Переключение источника питания на требуемую величину напряжения осуществляется с помощью ключа K_1 . Вторая обмотка трансформатора T защищена предохранителем F_U . Один из выводов вторичной обмотки подключается к заземлителю.

Блок измерителя 2 представляет собой фильтр напряжения нулевой последовательности, состоящий из трех переменных резисторов R_1, R_2, R_3 , соединенных в звезду. Свободные концы указанных резисторов присоединены к выходным клеммам A, B, C от которых идут отпайки на переключатель K_2 , посредством которого осуществляются переключения в процессе измерений для последовательной регистрации измеряемых параметров в каждой ветви звезды резисторов. К общей точке звезды резисторов R_1, R_2, R_3 подключается переменный резистор R_0 , другой конец которого включается в выходную цепь источника питания.

Блок активных сопротивлений 3 представляет собой звезду активных сопротивлений R_A, R_B, R_C , подключенных к клеммам A_1, B_1, C_1 . Общая точка звезды резисторов присоединяется к заземленному концу обмотки источника питания.

Блок емкостных сопротивлений 4 образован соединенными в звезду емкостями C_A, C_B, C_C свободные концы которых подключены к клеммам A_2, B_2, C_2 . Общая точка звезды емкостей присоединяется к источнику питания аналогично блоку 3.

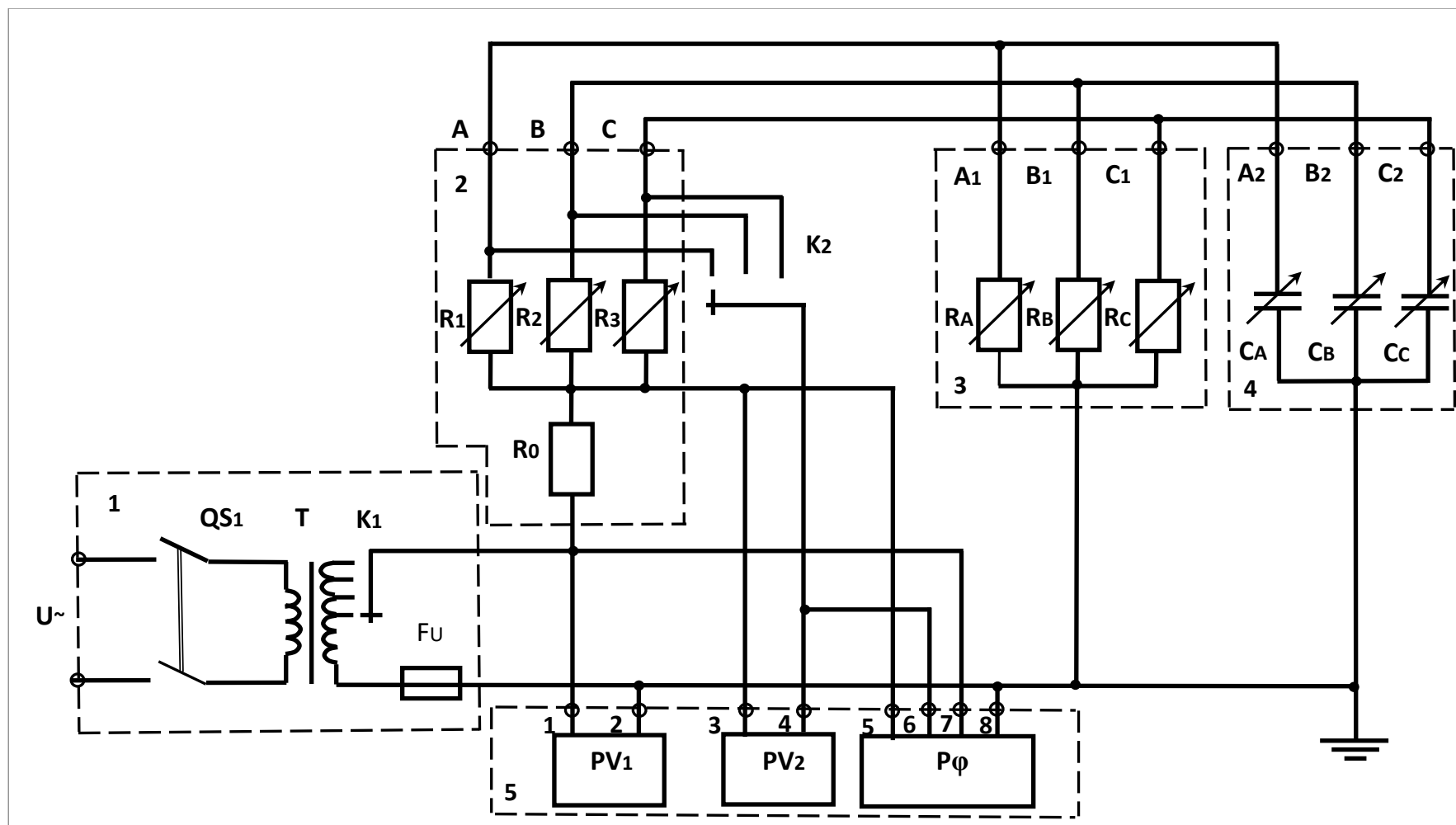


Рисунок 5.14 – Схема испытательного стенда для экспериментального исследования
несимметричных режимов утечки тока

Блок измерительных приборов 5 состоит из двух вольтметров PV_1 и PV_2 , а также фазометра $P\phi$. Вольтметр PV_1 подключается к клеммам 1,2 и предназначен для измерения напряжения источника питания. Вольтметр PV_2 подключается к клеммам 3 (общая точка звезды резисторов R_1 , R_2 , и 4 (переключатель K_2) и предназначен для поочередного измерения падения напряжения на резисторах R_1 , R_2 , R_3 , величина которого пропорциональна току, протекающему через эти сопротивления. Фазометр $P\phi$ имеет четыре клеммы присоединения и предназначен для определения угла сдвига фаз между напряжением источника питания и напряжением, снимаемым поочередно с сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 соответственно.

Вся система представляет собой замкнутый контур: начало вторичной обмотки трансформатора T , резистор R_0 , звезда R_1 , R_2 , R_3 , звезда R_A , R_B , R_C , параллельная ей звезда C_A , C_B , C_C , конец вторичной обмотки трансформатора T (земля).

Разработанное устройство позволяет определить оптимальные параметры измерителя 2 при различных вариациях параметров блоков 3, 4 и напряжения источника питания.

Исследование режимов утечки тока на физической модели подземной электрической сети

С целью выявления влияния на условия электробезопасности режимов генерирования электродвигателями обратной ЭДС, и проверки результатов математического моделирования была построена физическая модель подземной электрической сети напряжением 0,4 кВ [165, 328].

Модель состояла из двух асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью 30 кВт каждый и номинальным числом оборотов $n_{об} = 1450$ об/мин (номинальный коэффициент мощности $\cos\phi_{ном} = 0,87$), двух магнитных пускателей ПВИ-63Б, автоматического выключателя АФВ-1А, реле утечки типа УАКИ-380, батареи статических конденсаторов, а также конденсаторов и резисторов, имитирующих параметры сопротивления изоляции сети относительно земли. Компенсирующий дроссель

УЗО был настроен в резонанс с емкостью сети 0,5 мкФ. Масштаб напряжения и параметров сопротивления изоляции модели и реальной сети принят равным единице.

Схема физической (натурной) модели подземной электрической сети показана на рисунке 5.15.

Исследование режимов утечки в подземной электрической сети на физической модели и в последующем в производственных условиях эксплуатации рудничного электрооборудования осуществлялось при помощи светолучевого осциллографа Н-377. Для имитации однофазной утечки тока (прикосновения человека к фазе сети) и управления регистрирующим прибором разработано коммутационное устройство, позволяющее производить запись величины и длительности тока, протекающего через схему замещения человека.

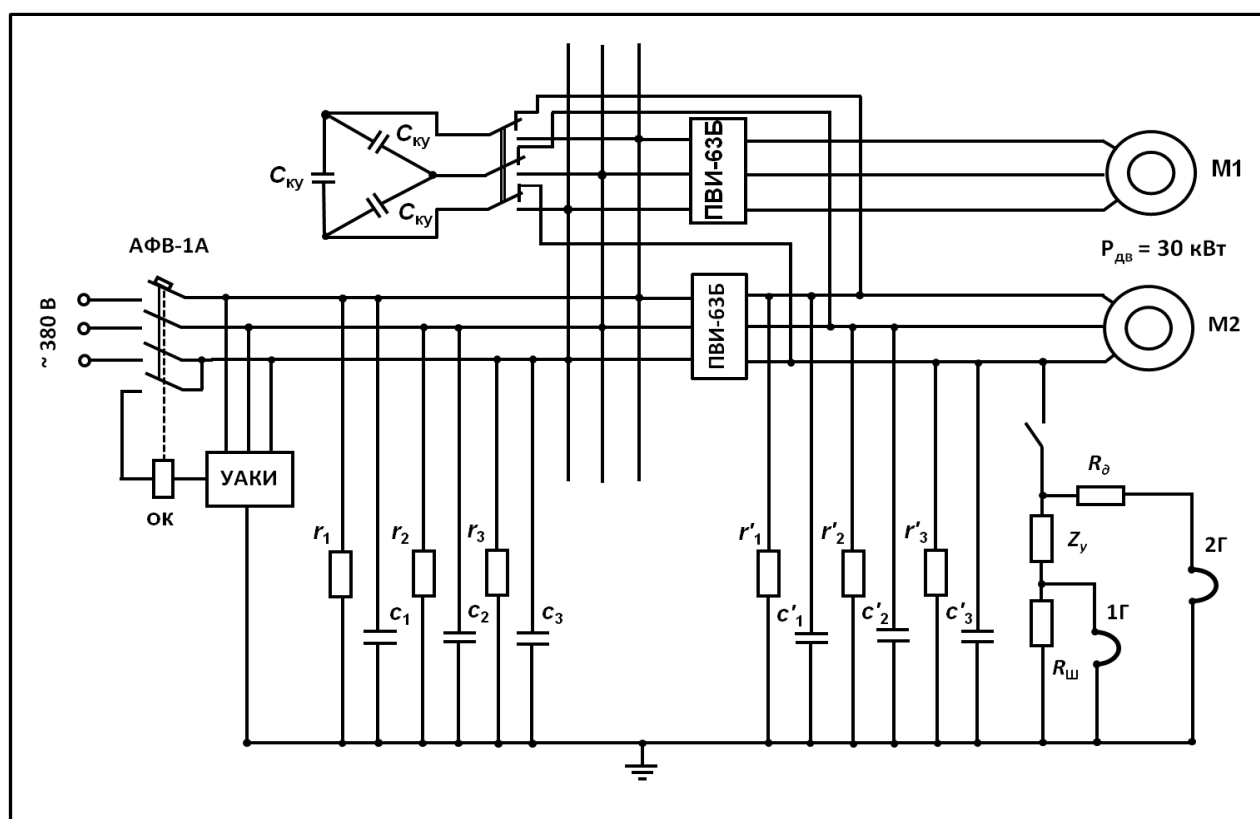


Рисунок 5.15 – Схема модели подземной электрической сети

На рисунке 5.16 изображена схема для измерения напряжения прикосновения и тока утечки в рудничной низковольтной сети с электродвигателями, оборудованной УЗО, при имитации однополюсного

прикосновения человека к фазе сети или корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением.

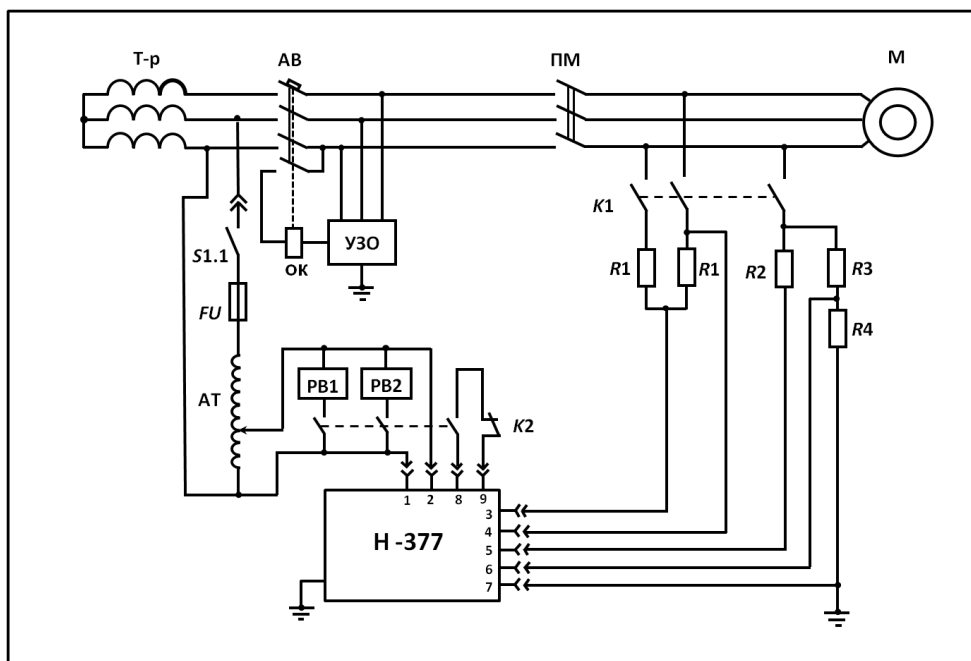


Рисунок 5.16 – Схема для измерения напряжения прикосновения и тока утечки в подземной электрической сети с электродвигателями

Запись исследуемых параметров проводилась следующим образом.

Включением выключателя $S1.1$ подается питание на автотрансформатор AT и светолучевой осциллограф. При включении $S2.1$ запускается реле времени $PB1$ и $PB2$, а также двигатель лентопротяжного механизма. Реле времени $PB1$ своими контактами $K1$ замыкает цепь R_2 , R_3 , Z_h имитирующую прикосновение к фазе сети, и сопротивление R_1 для измерения напряжения прикосновения $U_{пр}$. Значения эквивалентного тока через тело человека и напряжения прикосновения в функции времени записываются на специальную фотобумагу. Установка реле времени выбрана таким образом, что исследуемый процесс записывается в необходимом интервале времени. После срабатывания $PB2$ размыкаются контакты $K2$ и двигатель лентопротяжного механизма останавливается.

На рассматриваемой модели имитировали однофазную утечку на ответвлении пускатель-электродвигатель близкую к уставке срабатывания УЗО. При прикосновении человека (для имитации использовалось сопротивление в 1

кОм) к фазе ответвления реле утечки четко срабатывало.

Характерная осциллограмма тока утечки приведена на рисунке 5.17. В режиме генерирования обратной ЭДС находился один электродвигатель 30 кВт. Сопротивление и емкость магистрального кабеля составили $R_1 = R_2 = R_3 = 300$ кОм, $C_1 = C_2 = C_3 = 0,25$ мкФ. Сопротивление и емкость ответвления «пускатель-электродвигатель» составили соответственно $R'_1 = R'_2 = R'_3 = 12$ кОм и $C'_1 = C'_2 = C'_3 = 0,02$ мкФ. Батарея статических конденсаторов отключена. Компенсатор емкостного тока утечки на УЗО также отключен.

Для приведенного случая количество электричества определится по формулам:

$$Q_{h,cr} = I_t t_{cr} = 81,9 \cdot 0,1 = 8,19 \text{ мА} \cdot \text{с};$$

$$Q_{h,гр} = \int_0^{t_{гр}} I_h(t_{гр}) dt_{гр} = \int_0^{0,256} (-110,9 t_{гр} + 73,7) dt_{гр} = 15,23 \text{ мА} \cdot \text{с};$$

$$Q_{h,инд} = \int_0^{t_{инд}} I e^{-\frac{t_{инд}}{\tau}} dt_{инд} = \int_0^{1,17} 25,5 e^{-\frac{1,77}{1,1}} dt_{инд} = 18,4 \text{ мА} \cdot \text{с}.$$

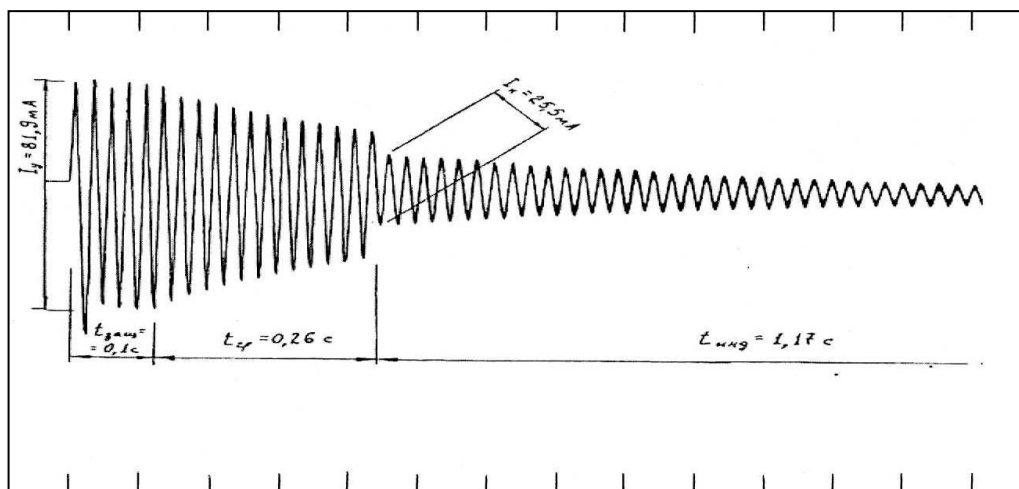


Рисунок 5.17 – Характерная осциллограмма тока через схему замещения тела человека ($R_h = 1$ кОм) при отключении электродвигателя мощностью 30 кВт

Суммарное количество электричества, проходящего через цепь утечки, имитирующую однополюсное прикосновение человека фазе сети, за время существования режима утечки через человека составило:

$$Q_h = Q_{h,cr} + Q_{h,гр} + Q_{h,инд} = 41,82 \text{ мА} \cdot \text{с}.$$

На рисунке 5.18 приведена осциллограмма тока через цепь утечки в режиме генерирования обратной ЭДС двумя отключаемыми от сети электродвигателями при неизменных параметрах изоляции. Анализ показывает, что на параметры режима существенно влияет величина и скорость изменения остаточного напряжения, приложенного к человеку. Длительность воздействия и амплитудные значения токов через человека изменяются несущественно и в основном определяются скоростью затухания электромагнитных колебаний в роторных цепях электродвигателей.

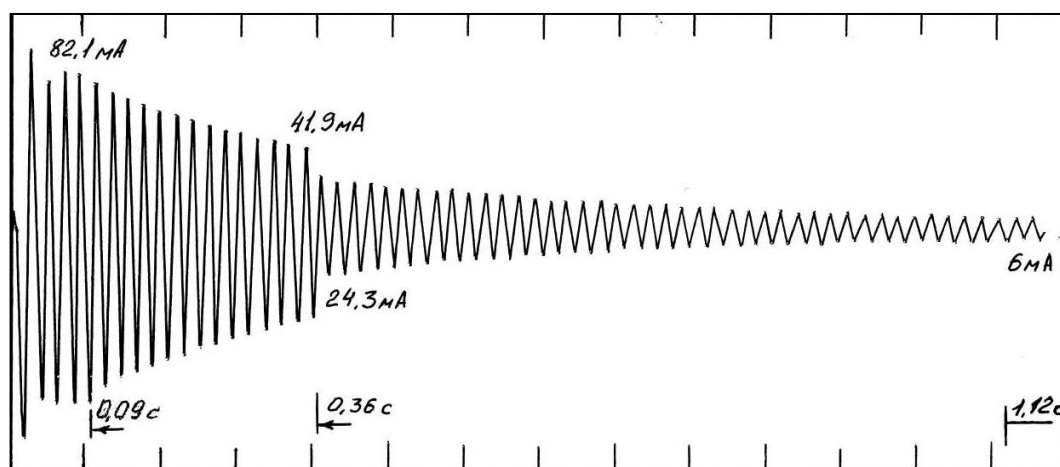


Рисунок 5.18 – Осциллограмма тока через схему замещения человека ($R_h = 1$ кОм) при отключении двух электродвигателей мощностью по 30 кВт

На рисунке 5.19 приведена осциллограмма тока через цепь утечки в режиме генерирования обратной ЭДС одиночным двигателем при включенном в УЗО компенсаторе емкостного тока утечки (отпайка дросселя на 0,5 мкФ/фазу). Сопротивление и емкость магистрального кабеля составили $R_1 = R_2 = R_3 = 300$ кОм, $C_1 = C_2 = C_3 = 0,25$ мкФ. Сопротивление и емкость ответвления «пускатель-электродвигатель» составили соответственно $R'_1 = R'_2 = R'_3 = 300$ кОм и $C'_1 = C'_2 = C'_3 = 0,5$ мкФ. Анализ показывает, что при компенсации емкостного тока утечки амплитудные значения тока через человека существенно снижаются только до момента отпадания силовых контактов пускателя, т.е. когда емкость сети максимальна и компенсатор эффективно работает. После отключения магистрального кабеля ток утечки определяется параметрами изоляции

ответвления, а интенсивность его снижения – индивидуальными параметрами электродвигателя. В этот интервал времени компенсации емкостного тока утечки не происходит.

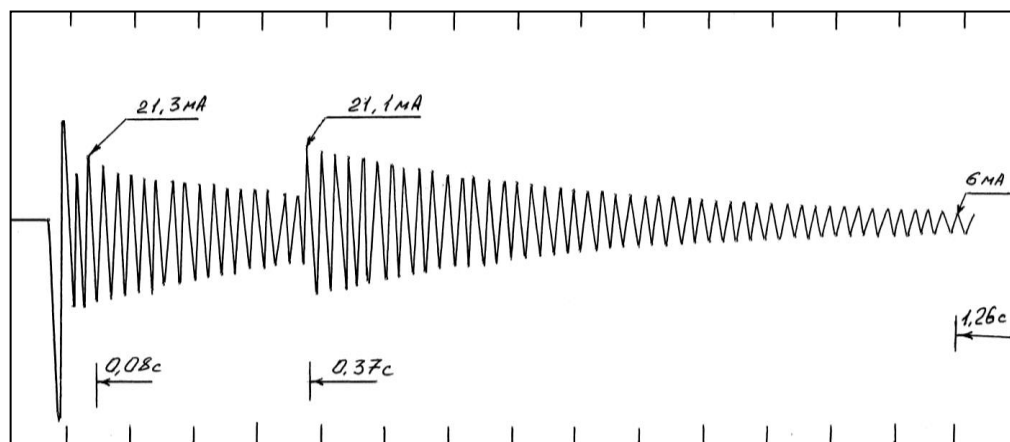


Рисунок 5.19 – Осциллограмма тока через схему замещения человека ($R_h = 1$ кОм) при включенном в УЗО компенсаторе емкостного тока утечки

После срабатывания УЗО длительность существования остаточного напряжения в отключаемой электрической сети при генерировании обратной ЭДС в основном определяется параметрами и режимом работы электродвигателей и в меньшей степени зависит от уровня сопротивления изоляции сети.

Длительность существования остаточного напряжения при генерировании обратной ЭДС отдельно работающим электродвигателем зависит от сопротивления изоляции сети и степени компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю.

Исследования на физической модели позволили сделать следующие выводы.

1. Длительность снижения тока утечки до 6 мА в режиме генерирования обратной ЭДС в значительной степени определяется скоростью затухания электромагнитных колебаний в роторных цепях электродвигателей.

2. Величина количества электричества Q_h в режиме генерирования обратной ЭДС электродвигателями мощностью менее 45 кВт может превышать допустимое значение $Q_{h, \text{доп}}$.

3. Амплитудные значения тока через человека в режиме генерирования обратной ЭДС определяются только величиной приложенного к нему остаточного напряжения и параметрами изоляции электрической сети, и в меньшей степени зависят от электрических параметров двигателей.

4. Режимы утечки значительно влияют на возможность поражения электрическим током, т.к. длительность опасного воздействия может достигать 1,5 – 3,5 с.

5. Частота тока при отключении отдельных электродвигателей, работающих на холостом ходу или в режиме вентилятора, изменяется незначительно, а при отключении группы электродвигателей может уменьшаться более чем в два раза.

6. При исправно действующей аппаратуре защитного отключения возможно поражение человека электрическим током за счет продолжительного воздействия остаточного напряжения при генерировании электродвигателями обратной ЭДС.

Результаты экспериментальных исследований режимов утечки тока электрических сетях шахт и рудников

Основные экспериментальные исследования проводились в условиях железорудной шахты «Артем-1» (г. Кривой Рог, Украина) и угольных шахт г. Новомосковска и г. Киреевска (Россия). Объектами исследований были участковые электрические сети напряжением 380 В и 660 В, а также отдельные электроустановки: вентиляторы местного проветривания типа СВМ, ВМ, ПСУ, привод насосов водоотлива мощностью 75 – 200 кВт, скребковых и ленточных конвейеров мощностью 55 – 75 кВт, питатели и лебедки, дымососы 315 кВт и насосы высокого давления 200 и 250 кВт.

Для получения информации о величине и длительности протекания тока утечки применен метод осциллографирования процесса. Запись в определенном масштабе зависимости тока, протекающего через цепь утечки от времени воздействия, представлена в виде расшифрованной осциллограммы.

Осциллографирование производилось как при отключенной отключающей катушке автоматического выключателя, так и подключенной. Параметры изоляции относительно земли измерялись до осциллографирования по методу

амперметра-вольтметра, разработанному профессором Л.В. Гладилиным [32]. При проведении производственных экспериментов все машины и механизмы находились в нормальном рабочем режиме.

Основные результаты экспериментальных исследований на предприятиях подземных шахт и рудников приведены в таблице 5.6.

Характерные осциллограммы напряжения прикосновения и тока утечки приведены на рисунках 5.20 и 5.21.

Анализ результатов осциллографирования показал, что длительность существования остаточного напряжения под действием обратной ЭДС выбега колеблется в пределах от 0,18 до 2,83 с. Наибольшую опасность для человека представляет прикосновение на участке «пускатель-электродвигатель».

При существующих типах УЗО, после их срабатывания, величина тока утечки через человека превышает допустимые уровни из-за перехода асинхронных электродвигателей в режим генерирования обратной ЭДС.

Прикосновение на магистральном участке сети имеет меньшую степень опасности, так как при этом сказывается взаимное влияние электродвигателей, приводящее к более быстрому погашению обратной ЭДС за счет появления уравнивающих токов. Существенное влияние на длительность токов утечки оказывает степень загрузки асинхронных двигателей.

Изложенное выше позволило сделать вывод о том, что в процессе эксплуатации электрооборудования в рудничных и шахтных участковых электрических сетях опасность поражения токами утечки возможна при проведении пусконаладочных и профилактических работ на отдельных электроустановках с приводом от асинхронных двигателей мощностью 30 – 315 кВт, работающих в режимах холостого хода или вентилятора.

С целью определения величины тока I_h , проходящего через тело человека за время срабатывания УЗО, проведена обработка результатов осциллографирования режимов утечки в реальных электрических сетях горных предприятий.

Таблица 5.6 – Основные результаты экспериментальных исследований в условиях шахт и рудников

Наименование шахты, подстанции	Номер участка, тип оборудования	$P_{дв}$, кВт	Тип защиты	Ток утечки, $I_{h,уст}$, мА	$Q_{сз}$, мА·с	$Q_{эдс}$, мА·с	$t_{эдс}$, с
ш. Артем-1; УПП-3 Горизонт 770	СВМ-6М	14	САЗУ	176	10,2	19,6	0,8
	ЛС-55	–	АСЗС-У5	168	12,3	3,84	0,3
	СВМ-6М	14	АСЗС-У5	200	12,3	37,7	0,95
	СП-63	45	АСЗС-У5	179	12,8	5,5	0,18
	Насос дренаж.	125	АСЗС-У5	189	12,6	64,2	2,25
	Насос дренаж.	200	АСЗС-У5	210	28,1	87,5	2,83
ш. им. С.М. Кирова; УПП-1 Горизонт 730	Блок 102	–	САЗУ	179	14,3	6,1	0,22
	Блок 88	–	САЗУ	149	5,5	14,1	0,5
	Блок 75	–	УАКИ	129	–	15,2	0,18
	Блок 24	–	УАКИ	158	8,8	26,3	0,41
	Насос дренаж.	55	САЗУ	136	–	33,0	1,25
	ПСУ	13	САЗУ	171	–	28,0	1,03
ш. Прогресс	А103-05	100	АСЗС-У5	196	18,6	98,3	1,3
	ВМ-6М	24	АЗШ-1	152	8,18	20,4	0,7
	ВМ-6М	24	АЗШ-1	135	6,7	14,5	0,66
	конвейер	75	АЗШ-1	177	11,7	8,6	0,27
ш. Донская	насос дренаж.	75	АЗШ-1	148	7,8	46,3	1,88
	ВМ-5М	13	АЗШ-1	136	10,1	15,3	0,66
	ВМ-6М	24	АЗШ-1	141	13,3	18,4	0,75
	Уч. №21	–	УАКИ	115	5,6	4,8	0,2
ш. Киреевская	АО2-51	7,5	УАКИ	108	0,2	7,7	0,7
	Дымосос Д-300	315	АЗУР-1	448	48	165	3,8
	Вентилятор ВВД-200	200	АЗУР-1	262	30	102	2,9
	Вентилятор ВВД-250	250	АЗУР-1	211	36	126	3,2

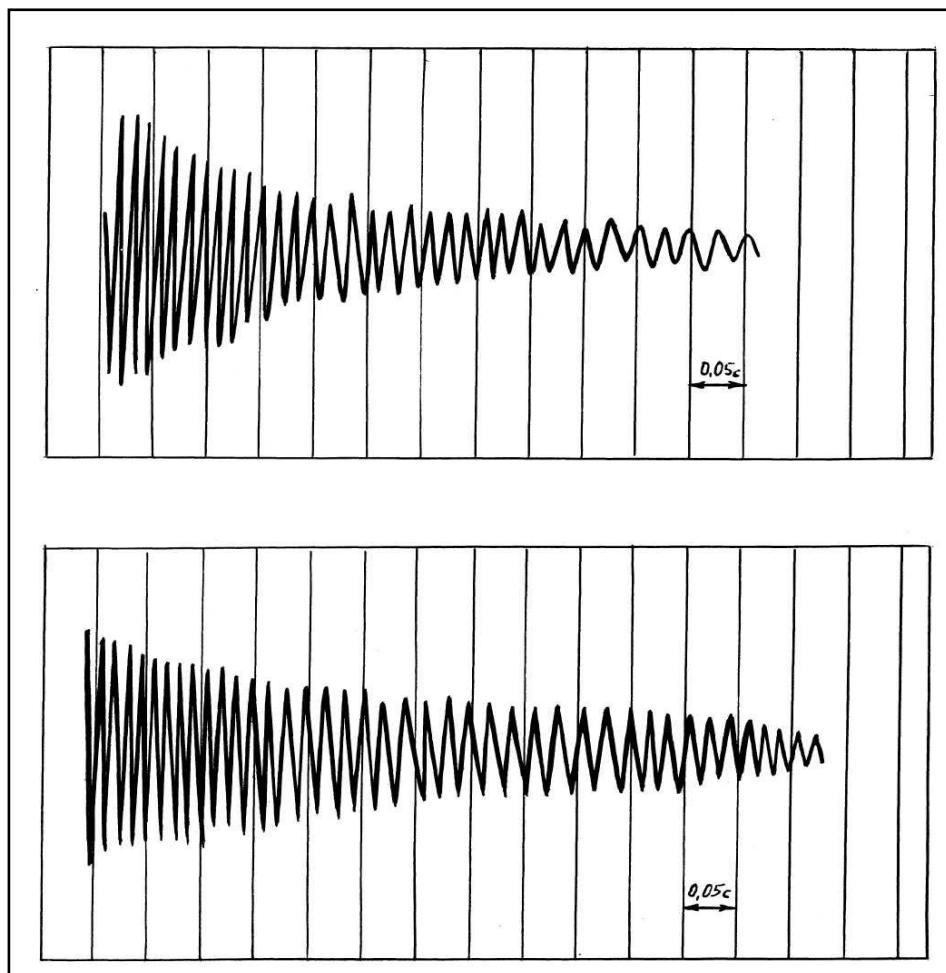


Рисунок 5.20 – Осциллограммы напряжения прикосновения: а) вентилятор ПСУ (13 кВт);
б) насос водоотлива (125 кВт)

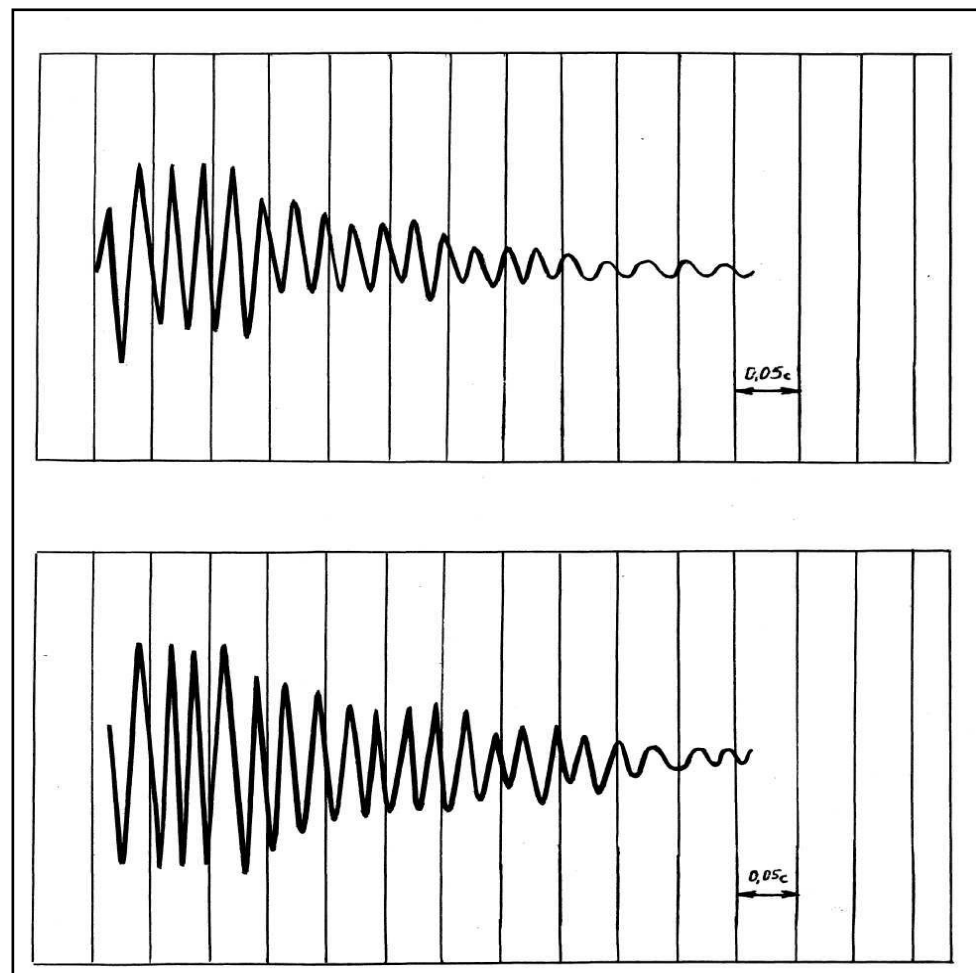


Рисунок 5.21 – Осциллограммы тока через человека:
а) шахта «им. Кирова», УПП-1, блок 88
б) шахта «им. Кирова», УПП-1, блок 102

Исследованию были подвергнуты сети напряжением 380/660 В, оборудованные УЗО типа УАКИ, САЗУ, АЗШ-1, АСЗС-У5, АЗУР-1А.).

На основании анализа приведенных данных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы.

1. При наличии остаточного напряжения в отключаемой электрической сети возможно поражение электрическим током, так как время его протекания в цепи утечки количество электричества превышает допустимый уровень $Q_{\text{доп}} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

2. С точки зрения влияния режимов утечки наиболее опасны электрические сети с вентиляторной нагрузкой и электродвигателями, работающими в режиме холостого хода.

3. При оценке опасности токов утечки в электрических сетях необходимо учитывать режимы, обусловленные генерированием обратной ЭДС индивидуальными электродвигателями, а также группой одновременно отключаемых электродвигателей.

5.6. Устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети

Автором разработано устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети [298], на базе которого реализуется оценка выполнения условий электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью [301].

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.

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.

Технический результат достигается тем, что устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети содержит блок имитации режима утечки тока отличающийся тем, что сигнал, эквивалентный току, протекающему через имитатор электрических параметров сопротивления тела человека, подается с шунтирующего сопротивления на выпрямитель, состоящий из операционного усилителя, включенных в его обратную связь точечных диодов и конденсаторного фильтра для защиты от режима автогенерации, интегратор, состоящий из выполняющего функцию сумматора входного сигнала операционного усилителя, включенного в его обратную связь конденсатора и резистора для задания постоянной интегрирования, резисторов, выпрямляющих и срезающих обратный фронт выходного сигнала интегратора, преобразователь напряжение-частота, состоящий из операционного усилителя, преобразующего выходной сигнал интегратора в частотный сигнал, регулировочного резистора для балансировки и коррекции частотной характеристики, транзистора, включенного параллельно конденсатору обратной связи усилителя интегратора, блок управления, состоящий из выключателей и переключателей режима работы, регистрирующий прибор, цифровой индикатор, блок питания операционных усилителей и блок контроля исправности устройства.

Устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети поясняется чертежом, где на рисунке 5.22 представлена структурная схема устройства для определения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети. На рисунке 5.23 приведена принципиальная электрическая схема данного устройства.

Предлагаемое устройство содержит блок имитации 1 режима утечки тока, включающий, предохранитель 10, имитатор 12 электрических параметров сопротивления тела человека и шунтирующее сопротивление 11,

выпрямитель 2, состоящий из операционного усилителя 13, включенных в его обратную связь точечных диодов 16 и конденсаторного фильтра 17, интегратор 3, состоящий из операционного усилителя 14, включенного в его обратную связь конденсатора 19 и резисторов 18, 20, преобразователь напряжение-частота 4, состоящий из операционного усилителя 15, регулировочного резистора 21, транзистора 22, включенного параллельно конденсатору 19 обратной связи усилителя 4 интегратора 3, блок управления 9, состоящий из выключателей 25, 28, переключателей 26, 27 и сигнальной лампы 29, балластные сопротивления 23 и миллиамперметр 24 регистрирующего прибора 5, цифровой индикатор 6, блок питания 7 операционных усилителей 13, 14, 15, блок 8 контроля исправности устройства, включающий конденсатор 30 и кнопку 31 проверки.

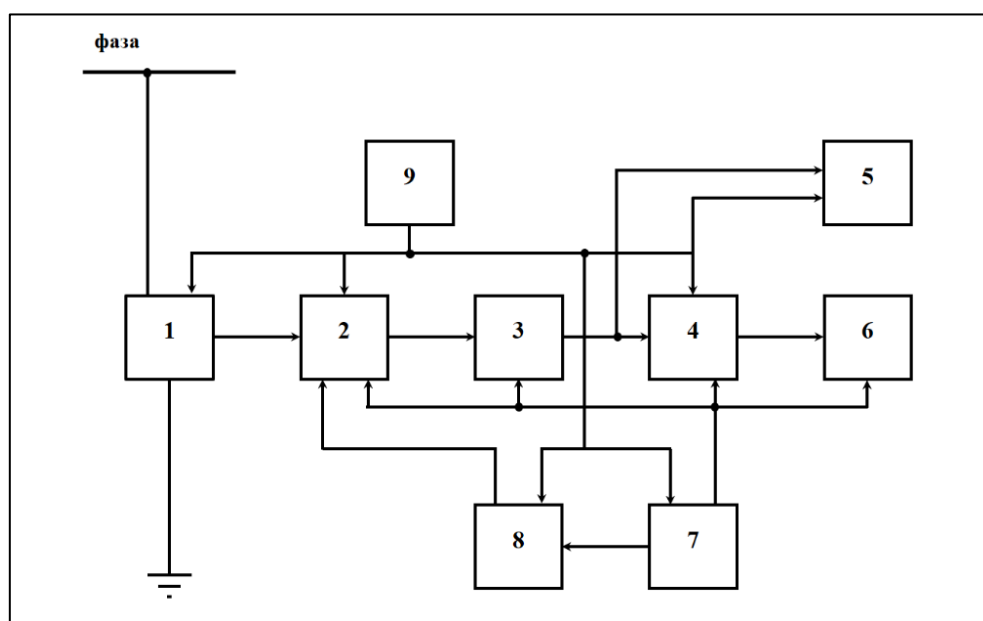


Рисунок 5.22 – Блок-схема устройства для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети

Устройство подключается к трехфазной электрической сети, оборудованной УЗО и автоматическим выключателем, между фазой и землей.

Принцип действия устройства заключается в следующем.

Перед подключением устройства к сети выключатель 25 блока управления 9 находится в положении «Откл.», переключатель 26 в положении

«Вкл.». Выключателем 28 включается блок питания 7 операционных усилителей 13, 14, 15 и блок 8 контроля исправности устройства, что приводит к зарядке конденсатора 30. На блоке управления 9 загорается сигнальная лампа 29. После нажатия кнопки 31 «Проверка» на вход выпрямителя 2 подается импульсный сигнал тока разряда конденсатора 30, который, в случае исправности устройства, проходит через выпрямитель 2, интегратор 3 и преобразователь напряжение-частота 4 (ПНЧ). На миллиамперметре 24 регистрирующего прибора 5 стрелка отклоняется до контрольной отметки и загорается контрольная цифра на цифровом индикаторе 6.

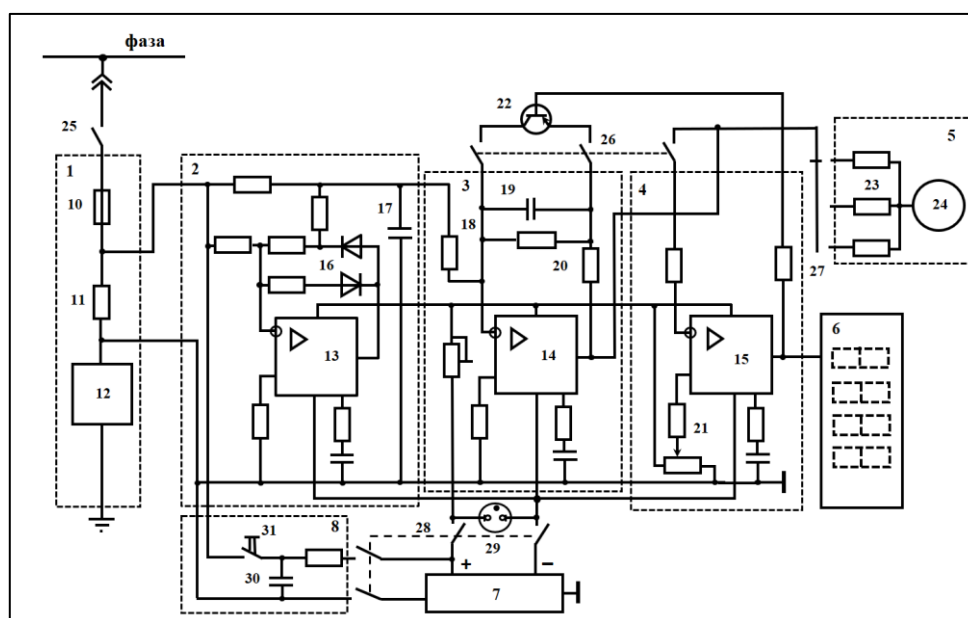


Рисунок 5.23 – Принципиальная электрическая схема устройства для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети

Для измерения в количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети, переключатель 26 устанавливается в положение «Вкл.». Выключателем 28 включается блок питания 7 операционных усилителей 13, 14, 15. Включением выключателя 25 в положение «Режим» создается утечка тока через блок имитации 12, что приводит к срабатыванию УЗО. За время срабатывания УЗО и отключения автоматического выключателя через блок имитации 1 проходит количество

электричества, эквивалентное произведению тока утечки на время срабатывания защиты. После отключения сети автоматическим выключателем электродвигатели переходят в режим генерирования обратной ЭДС, за время затухания которой через блок имитации 1 проходит количество электричества, эквивалентное произведению тока утечки на время затухания остаточного напряжения в электрической сети. Напряжение, пропорциональное току утечки через имитатор 12 снимается с шунтирующего сопротивления 11 и подается на выпрямитель 2. При этом на выходе операционного усилителя 13 сигнал после прохождения через диоды 16 обратной связи примет форму затухающего двухполупериодного тока. На вход интегратора 3 подается сглаженный конденсаторным фильтром 17 выпрямленный сигнал, который интегрируется операционным усилителем 14 в сигнал, пропорциональный количеству электричества, протекающего через имитатор 1. Формирование частотного сигнала в блоке ПНЧ 4 осуществляется посредством включения в цепь обратной связи операционного усилителя 14 электронного ключа, выполненного на базе транзистора 22. Выходной сигнал с блока ПНЧ 4 поступает на миллиамперметр 24 регистрирующего прибора 5 и цифровой индикатор 6.

В случае если контакты переключателя 26 разомкнуты, блок ПНЧ 4 и цифровой индикатор 6 отключены, на выходе операционного усилителя 14 появляется сигнал, эквивалентный количеству электричества, протекающего через блок имитации 1 включения человека в электрическую цепь. Этот сигнал через переключатель 27 фиксируется только миллиамперметром 24 регистрирующего прибора 5, регулировка диапазона измерения которого осуществляется балластными сопротивлениями 23.

Необходимость двух регистрирующих приборов обусловлена тем, что если в сети есть статические заряды или включены аппараты с нелинейными характеристиками, то это искажает показание цифрового индикатора 6, и необходимо пользоваться миллиамперметром 24 регистрирующего прибора 5. В остальных случаях, если необходимо с высокой точностью измерить

количество электричества, то используется цифровой индикатор 6, фиксирующий и запоминающий полученное значение, т.к. регистрирующий прибор 5 фиксирует только максимальную амплитуду эквивалентного выходного сигнала, после чего стрелка миллиамперметра 24 снова возвращается в нулевое положение.

Если положение стрелки регистрирующего прибора 5 и показание цифрового индикатора 6 превысит значение $50 \text{ мА} \cdot \text{с}$, то данная сеть опасна, и установленная аппаратура защитного отключения не обеспечивает условий безопасной эксплуатации данной сети.

Защита устройства от повышенного напряжения в трехфазной электрической сети осуществляется предохранителем 10 блока имитации 1 режима утечки тока.

Устройство для определения количества электричества Q_h , проходящего через человека, прикоснувшегося к фазе электрической сети, позволяет количественно оценить опасность поражения токами переходных процессов, возникающих за счет генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

Проверка разработанного устройства на физической модели электрической сети показала, что проведение измерений занимает очень мало времени, полученные результаты имеют достаточно хорошую точность (в пределах 10%), что было определено путем сравнения с осциллограммами, соответствующими контролируемым режимам работы сети.

Анализ результатов исследования влияния переходных процессов на условия электробезопасности при эксплуатации шахтного низковольтного электрооборудования позволил разработать некоторые практические рекомендации по ограничению длительности опасного воздействия электрического тока на организм человека.

5.7. Выводы

Выполненные аналитические исследования переходных процессов в подземной электрической сети позволили получить следующие результаты.

1. В подземных электрических сетях горных предприятий существует опасность поражения человека электрическим током.
2. Современные серийно выпускаемы устройства защитного отключения при уровне напряжения электрической сети 1140 В в целом эффективно срабатывают в режимах симметричной и несимметричной утечки тока. Однако из-за возникающих переходных процессов при значительной протяженности кабельных линий эффективность работы компенсатора емкостного тока утечки существенно ограничена, т.к. за время срабатывания УЗО и после отключения автоматического выключателя происходит разряд емкости фазной изоляции в цепь утечки.
3. Средством повышения эффективности УЗО является предложенный в диссертации способы пофазной компенсации емкостного тока утечки и пофазного контроля сопротивления изоляции.
4. Наибольшую опасность представляет режим генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями мощностью менее 45 кВт, при котором в цепи утечки тока через человека проходящее количество электричества может значительно превысить допустимый уровень 50 мА·с.
5. Наиболее эффективным представляется применение устройства ограничения длительности электромагнитного переходного процесса при генерировании обратной ЭДС электродвигателями, предложенный в четвертой главе диссертации, а также устройство контроля количества электричества в цепи утечки, разработанное в данной главе.

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 $R_l \leq 31,5$ кОм/фазу и емкости $C_l \geq 0,3$ 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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

АД – асинхронный электродвигатель;

БРУ – блокировочное реле утечки;

КУДТ – комбинированное устройство динамического торможения;

ННП – напряжение нулевой последовательности;

ПКЭС – подземные комбинированные электрические сети;

ПФИ – параметры функционального использования;

ПЧ с АИН – преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения;

ПЭС ГП – подземные электрические сети горных предприятий;

ПЭС ПЧ – подземные электрические сети промышленной частоты;

СрТКЭ – средства технического контроля электробезопасности;

СТДК-ЭО – система технического диагностирования и контроля параметров и режимов работы электрооборудования;

СУЭБ – система управления электробезопасностью;

СФ – синус-фильтр;

ТНП – ток нулевой последовательности;

ТР – силовой трансформатор;

УЗО – устройство защитного отключения;

УЗТУ – устройство защиты от тока утечки;

УИКЭ – устройство измерения количества электричества;

УКИ – устройство контроля изоляции;

ФКУ – фильтро-компенсирующее устройство;

ЧРЭП-АД – частотно-регулируемый электропривод с асинхронным электродвигателем;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ЭТКС – электротехнические комплексы и системы;

ЭУ – электроустановка.

Термины и определения согласно ГОСТ 12.4.155-85

Источник: Межгосударственный стандарт ССБТ. ГОСТ 12.4.155-85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования. / –М.: Издательство стандартов. – 1985. – 9 с.

Устройство защитного отключения – это устройство, предназначенное для автоматического отключения электроустановок при однофазном (однополюсном) прикосновении к частям, находящимся под напряжением, недопустимым для человека, и (или) при возникновении в электроустановке тока утечки (замыкания), превышающего заданные значения (в дальнейшем устройства защитного отключения – УЗО).

Ток утечки (в сети с изолированной нейтралью и сети постоянного тока) – это ток, протекающий между находящейся под напряжением фазой (полюсом) и землей в результате снижения сопротивления изоляции; в сети с глухозаземленной нейтралью – ток, протекающий по участку сети параллельно току в нулевом проводе, а при отсутствии нулевого провода – ток нулевой последовательности.

Уставка УЗО – минимальное значение входного сигнала, вызывающего срабатывание УЗО и последующее автоматическое отключение поврежденного участка сети или токоприемника.

Термины и определения согласно ГОСТ 30331.1-2013

Источник: Межгосударственный стандарт ГОСТ 30331.1-2013. Электроустановки низковольтные. Часть 1. Основные положения, оценка общих характеристик, термины и определения / –М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». – 2014. – 68 с.

Ток прикосновения – это электрический ток, протекающий через тело человека и животного, когда они касаются одной или нескольких доступных частей электроустановки или электрооборудования при нормальных условиях.

Ток утечки – это электрический ток, протекающий в землю через открытые, сторонние проводящие части и защитные проводники при нормальных условиях.

Условный ток срабатывания (защитного устройства): Определенное значение электрического тока, вызывающее срабатывание защитного устройства в течение определенного времени.

Термины и определения согласно ГОСТ 31612–2012

Источник: Межгосударственный стандарт ГОСТ 31612–2012. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования / –М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». – 2013. – 11 с.

Ток утечки в сети – это ток между находящейся под напряжением фазой и землей вследствие снижения сопротивления изоляции.

Допустимый ток утечки – это наименьший ток утечки на землю любой фазы, вызывающий срабатывание устройства защиты при наибольших значениях емкости и напряжения сети.

Сопротивление изоляции фазы (сети): – это активное сосредоточенное (эквивалентное распределенному) сопротивление изоляции фазы (общее трех фаз) сети относительно земли.

Ёмкость фазы (сети) – это общая сосредоточенная (эквивалентная распределенной) электрическая емкость трех фаз (одной, двух фаз) сети относительно земли.

Симметричный ток утечки – это ток утечки при равенстве активных сопротивлений изоляции фаз и емкостей фаз относительно земли.

Несимметричный ток утечки – это ток утечки при неравенстве активных сопротивлений, когда наименьшее отличается от наибольшего в два и более раза.

Сопротивление срабатывания – это наибольшее значение сопротивления изоляции фазы (сети), вызывающее срабатывание устройства защиты.

Термины и определения общего доступа (интернет-ресурсы)

Физическая модель – физическое представление системы, объекта или процесса с целью их исследования, то есть это представление с помощью другого физического, реального объекта, имеющего в том или ином аспекте схожую динамику поведения. Это в то же время означает схожесть (или тождественность) математической модели объекта исследований и объекта-модели.

Режим утечки тока – определяется уровнем напряжения отдельных фаз электрической сети относительно земли при различных значениях активного сопротивления и емкости изоляции.

Ток абсорбции – протекающий через изоляционный материал ток, величина которого зависит от релаксационного вида поляризации и перераспределения свободных зарядов в объеме диэлектрика.

Ток сквозной проводимости – обусловлен направленным движением заряженных частиц (ионов) при приложении напряжения к изоляционному материалу и сопровождается нейтрализацией зарядов на оболочке или токоведущей жиле проводника электрического тока.

Ионная поляризация обусловлена смещением упруго связанных положительных и отрицательных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки, при воздействии электрического поля на ионный кристалл.

Дипольная релаксационная поляризация – определяется поворотом и ориентацией диполей в направлении поля и связана с тепловым движением частиц (полярных молекул, состоящих из положительных и отрицательных ионов).

Упругая поляризация, протекающая практически мгновенно под действием электрического поля, не сопровождающаяся рассеянием (потерями) энергии в диэлектрике (выделением теплоты);

Релаксационная поляризация, нарастающая и убывающая в течение некоторого промежутка времени и сопровождающаяся рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагреванием.

Электронная поляризация представляет собой процесс образования в электрическом поле упругих диполей в материале диэлектрика. В этом случае смещенные электроны с положительными зарядами ядер атомов образуют пары связанных друг с другом электрических зарядов.

Электронно-релаксационная поляризация – возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок. Этот вид поляризации характерен для диэлектриков с высоким показателем преломления и электронной электропроводностью, а также полупроводников.

Упруго-дипольная поляризация – возникает у дипольных молекул некоторых кристаллов, закрепленных и только ограниченно поворачивающихся на небольшой угол.

Межслойная поляризация – обусловлена проводящими и полупроводящими включениями и наличием слоев с различной проводимостью. Поляризация проявляется в твердых телах неоднородной структуры (слоистые пластики) в области низких частот, и связана со значительными потерями электрической энергии.

Остаточная поляризация – существует длительное время в диэлектрике после снятия напряжения. Этот тип поляризации наблюдается в электретах и обладает сильной зависимостью от напряженности электрического поля и температуры.

Список литературы

1. Антонов, Ю.П. исследование нового способа измерения сопротивления изоляции шахтных электрических сетей / Ю.П. Антонов., В.Г. Сокуренок // Безопасная эксплуатация электромеханического оборудования в шахтах. – 1972. – Выпуск № 4. – С. 26 – 33.
2. Ардасенов, В.Н. Устройства защиты от замыканий на землю в кабельных сетях / В.Н. Ардасенов, Б.С. Лазебников. – М.: ЦНИЭИуголь, 1971. – 52 с.
3. Бабокин, И.А. Управление безопасностью на горном предприятии / И.А. Бабокин. – М.: Недра, 1989. – 251 с.
4. Бабокин, И.А. Система безопасности труда на горных предприятиях / И.А. Бабокин. – М.: Недра, 1984. – 320 с.
5. Бабокин, Г.И. Исследование качества электроэнергии очистного забоя угольной шахты / Г.И., Бабокин, Ю.В. Шевырев, Н.Ю. Шевырева // Уголь. – 2021. – № 7. – С. 80 – 84.
6. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1982.
7. Бацежев, Ю.Г. Исследование электротехнических параметров и характеристик человека как объекта защиты от поражения электрическим током в шахтных сетях напряжением до 1000 В: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.281 / Бацежев Юрий Григорьевич. – М.: МГИ, 1971. – 18 с.
8. Бацежев, Ю.Г. Обоснование системы и разработка средств электробезопасности на горных предприятиях: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.26.01/ Бацежев Юрий Григорьевич. – М.: МГИ, 1986. – 31 с.
9. Бацежев, Ю.Г. Определение проводимостей трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью относительно земли / Ю.Г. Бацежев, Г.А. Немцев // В кн.: «Повышение надежности и электробезопасности систем электроснабжения горнорудных предприятий». – Качканар, 1979. – С. 34 – 35.
10. Бацежев, Ю.Г. Исследование влияния коммутационных процессов на условия электробезопасности в низковольтных сетях горнодобывающих предприятий / Ю.Г. Бацежев, И.Ф. Суворов // Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР: тезисы докладов и сообщений II

- Всесоюзной научно-технической конференции. – Днепропетровск. – Марганец, 1979. – С.168 – 169.
11. Бацежев, Ю.Г. Математическое моделирование нелинейных систем задач электробезопасности / Ю.Г. Бацежев, А.Ф. Федоров // В кн.: «Эффективность машинных решений краевых задач электробезопасности». – Куйбышев.: 1962. – С. 55 – 56.
 12. Бацежев, Ю.Г. Разработка подсистемы «Электробезопасность» в АСУ ЭШ. / Ю.Г. Бацежев, Д.Н. Чучелов, В.И. Петуров // «Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта»: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – Днепропетровск: ДГИ, – 1990. – С. 307–308.
 13. Безденежных, А.Г. Переходные процессы в цепях токов утечки и их влияние на электробезопасность шахтных электроустановок / А.Г. Безденежных, В.П. Анохин, И.К. Попов // В кн.: «Вопросы безопасности в угольных шахтах. Труды ВостНИИ, т.Х.» – М.: 1969. – С. 288 – 314.
 14. Безденежных, А.Г. Влияние переходного режима на опасность поражения электрическим током / А.Г. Безденежных, Н.В. Герцева //. В кн.: «Вопросы электроснабжения и электропривода». – Калинин: 1972. – С. 41 – 43.
 15. Белюстин, О.Н. Исследование условий эксплуатации и совершенствование аппаратов защиты от утечек тока на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Белюстин Олег Николаевич. – М.: МГИ, 1981. – 216 с.
 16. Бессонов, Е.А. Исследование способом измерения параметров изоляции шахтных низковольтных трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.28.01 / Бессонов Евгений Александрович. – Кемерово, КузПИ, 1967. – 25 с.
 17. Блауберг, И.В. Системный подход в современной науке / И.В. Блауберг, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин //. В кн.: «Проблемы методологии системных исследований». – М.: Мысль, 1970. – С. 7 – 48.

18. Блауберг, И.В. Философский принцип системности и системный подход / И.В. Блауберг, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин // Вопросы Философии. – 1978. – № 8. – С. 39 – 52.
19. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
20. Борисова, М.Э. Физика диэлектриков / М.Э. Борисова, С.Н. Койков. – Л.: ЛГУ, 1979. – 240 с.
21. Бухтояров, В.Ф. Централизованная защита от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / В.Ф. Бухтояров // Промышленная энергетика. – 1976. – № 11. – С. 38 – 41.
22. Вайлов, А.М. О влиянии переходных процессов в электрической цепи на опасность поражения человека электрическим током / А.М. Вайлов // Труды МИИТ, вып.315. – М.: МИИТ, 1968. – С.81 – 83.
23. Васильев, О. А. Устройство для автоматической компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях / О. А. Васильев, И. И. Мехине, А. П. Денисенко и др. // А.С. СССР № 390620, БИ № 30, – 1973.
24. Васюра, Ю.Ф. *Квазистационарные перенапряжения в сетях с изолированной, резонансно и эффективно заземленной нейтралью: учебное пособие* / Ю. Ф. Васюра. – Киров: ФГБОУ ВО «ВятГУ», 2016. – 83 с.
25. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 179 с.
26. Винославский, В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др. – К.: Выща шк., Головное изд-во, 1989. – 422 с.
27. Волотковский, С.А. Электротравматизм на горнорудных предприятиях Украины / С.А. Волотковский, А.И. Курьян, А.З. Николайчук // В кн.: «Электробезопасность на горнорудных предприятиях». – Днепропетровск, 1974. – С. 5 – 13.
28. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

29. Гамазин, С.И. Исследование динамических характеристик группового синхронного выбега / С.И. Гамазин, В.Н. Серебряков // Электричество. – 1977. – № 2, – С. 26 – 29.
30. Гамазин, С.И. Динамическое моделирование электродвигательной нагрузки в системах промышленного электроснабжения / С.И. Гамазин, Д.Б. Понаровкин, Юнес Тахсин // Труды МЭИ. – Вып. № 668, – 1994. – С.16 – 35.
31. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
32. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, П.И. Семичевский. – М.: Издательство МЭИ, 1985. – 92 с.
33. Гамазин, С.И. Пуск электрических двигателей / С.И. Гамазин, Т.А. Садыбеков. – Алма-Ата: Галым, 1992. – 235 с.
34. Гамазин, С.И. Переходные процессы в электродвигательной нагрузке систем промышленного электроснабжения / С.И. Гамазин, Д.Б. Понаровкин, С.А. Цырук. – М.: Издательство МЭИ, 1991. – 352 с.
35. Георгиади, В.Х. Упрощенный расчет группового выбега электроприводов собственных нужд / В.Х. Георгиади, Н.В. Логвенчева // Электрические станции. – 1985. – № 2. – С. 48 – 54.
36. Георгиади, В.Х. Методические указания по испытаниям электродвигателей собственных нужд подстанций и расчетам режимов их работы при перерывах питания. Расчет режимов работы электродвигателей собственных нужд при перерывах питания / В.Х. Георгиади, Н.В. Логвенчева, В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков. – М.: Союзтехэнерго, 1983. – 112 с.
37. Георгиади, В.Х. Об учете скин-эффекта при расчете процессов группового выбега и самозапуска асинхронных электродвигателей / В.Х. Георгиади // Электрические станции. – 1989. – № 4. – С. 36 – 40.

38. Георгиади, В.Х. Упрощенный расчет группового выбега электродвигателей и механизмов собственных нужд / В.Х. Георгиади, Н.В. Логвенчева // Электрические станции. – 1986. – № 3. – С.51 – 52.
39. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник / В.Г. Герасимов, П.Г. Грудинский, Л.А. Жуков и др. – М.: Энергия, 1981, т.1. – 586 с.
40. Гладилин, Л.В. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацезев Ю.Г. и др. – М.: Недра, 1977. – 327 с.
41. Гладилин, Л.В. Изоляция подземных установок шахт и электробезопасность. / Л.В. Гладилин, Б.Г. Меньшов, В.И. Щуцкий и др. – М.: Недра, 1966. – С. 96 – 100, 148 – 155.
42. Гладилин, Л. В. Измерение сопротивления относительно земли электроустановок с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В / Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Н.Я. Гущин // Безопасность труда в промышленности. – № 10. – 1974. – С. 51 – 53.
43. Гладилин, Л.В. Анализ условий безопасности в подземных кабельных сетях / Л.В. Гладилин // – В кн.: «Электрооборудование подземных выработок угольных шахт». – М.: 1955. – С. 272 – 289.
44. Гладилин Л.В. Исследование условий электробезопасности рудничных сетей с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / Гладилин Лев Вениаминович. –М.: МГИ, 1955. – 341 с.
45. Глазунов, Л.П. Проектирование технических систем диагностирования / Л.П. Глазунов, А.Н. Смирнов. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.
46. Голубков, Ю.П. Об опасности поражения человека электродвижущей силой, генерируемой асинхронными двигателями после отключения сети / Ю.П. Голубков, Л.С. Тонкошкур // В кн.: «Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР». – Днепропетровск-Марганец, 1979. – С. 156 – 157.
47. Гончар, Н.А. Разработка и исследование методов непрерывного контроля параметров изоляции шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В:

- дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Гончар Нинель Ароновна. – М.: МГИ. – 1973. – 107 с.
48. Глухарев, Ю.Д. Исследование состояния изоляции подземных электроустановок напряжением до 1000 В рудников цветной металлургии северных районов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Глухарев Юрий Дмитриевич. – М.: МГИ, 1973. – 15 с.
49. Горбачев, Г.Ф. Исследование условий электробезопасности при эксплуатации шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Горбачев Геннадий Филиппович. – М., 1979. – 179 с.
50. Гордон, Г.Ю. Электротравматизм на производстве / Г.Ю. Гордон, В.И. Филиппов, З.А. Яроченко. – Л.: Лениздат, 1973. – 213 с.
51. ГОСТ 31612-2012. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования.
52. Дейс, Д.А. Влияние электродвигателей в системах электроснабжения с глухозаземленной нейтралью до 1000 В на условия электробезопасности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Дейс Данил Александрович. Челябинск, – 2005. – 20 с.
53. Докукин, А.В. Определение активной и реактивной составляющих полной проводимости изоляции трехфазных сетей с изолированной нейтралью / А.В. Докукин, Е.Ф. Цапенко // Научно-исследовательские работы в угольной промышленности. – 1959. – № 2. – С. 131 – 135.
54. Дзюбан, В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
55. Дзюбан, В.С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной ЭДС шахтных электродвигателей / В.С. Дзюбан, Я.С. Риман // В кн.: «Сборник научных трудов ВНИИВЭ, вып. 6». – Энергия, 1969.
56. Дзюбан, В.С. Исследование переходных процессов в шахтных участковых электрических сетях и их влияние на аппаратуру защиты от утечек: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 173 / Дзюбан Виталий Серафимович. – Донецк, 1968. – 22 с.

57. Дзюбан, В.С. Эквивалентные схемы для определения токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан // «Взрывобезопасное электрооборудование». Вып. № 4. – М.: Энергия, 1966, с. 241 – 247.
58. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках / П.А. Долин. – М., Энергоатомиздат, 1984, – 448 с.
59. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов.// – М.: Наука, 1987. – 240 с.
60. Еллинек, С. Несчастные случаи от электричества / С. Еллинек. – М.: Вопросы труда, 1927. – 30 с.
61. Ефимова, М.Р. Общая теория статистики / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцев. – М.: ИНФА-М 1998, – 416 с.
62. Желиховский, Х.М. Исследования и разработка новых аппаратов защиты от утечек для шахтных участковых электрических сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Желиховский Хаим Менделеевич. – Донецк: ДПИ, 1964. – 32 с.
63. Жидков, В.О. Влияние ЭДС выбегов на эффективность защитного отключения / В.О. Жидков, В.И. Баскаков, А.Ф. Чумаков // В кн.: «Борьба с электротравматизмом при эксплуатации электрооборудования и повышение безопасности в угольных шахтах. Труды ВостНИИ. – Кемерово, 1975, т. 23, – С. 71 – 75.
64. Загороднюк, В.Г. Исследование влияния переходных процессов на безопасность эксплуатации шахтных низковольтных электрических сетей / В.Г. Загороднюк, М.А. Васильев // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1973. – № 6. – С.27 – 28.
65. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 980 с.
66. Ким, К.Е. Исследование нестационарных режимов шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В и их влияние на условия электробезопасности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ким Константин Енсуевич. – М., МГИ, – 1975. – 16 с.

67. Киселев, А.П. Ток в теле человека при различных формах приложенного напряжения / А.П. Киселев // Труды МИИТ, вып. 221, – М., Транспорт, 1966.
68. Ковалев, А.В. Устройство для измерения сопротивления изоляции относительно земли / А.В. Ковалев, Ю.П. Антонов, Э.Г. Шурин и др. // АС № 303596. БИ № 16, 1971.
69. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
70. Колосюк, В.П. Неустановившийся режим утечки на землю при автоматической компенсации его емкостной составляющей. В кн.: Вопросы горной электромеханики / В.П. Колосюк // Труды МакННН, т. ХХІ. – М.: Недра, 1971, – С. 15 – 27.
71. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк. – М.: Недра, 1980, – 334 с.
72. Колосюк, В.П. Исследование безопасных шахтных низковольтных электрических сетей при компенсации емкостных токов утечки: автореф дис. ... канд. техн. наук / Колосюк Владимир Петрович. – М.: МИРГЭ. – 1966. – 15 с.
73. Колосюк, В.П. Безопасная эксплуатация шахтных электроустановок / В.П. Колосюк, Э.С. Щурин, А.Н. Чулика. – Киев, Техніка, 1980. – 143 с.
74. Колосюк, В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1987. – 406 с.
75. Кононенко, В. П. Способ автоматической компенсации емкостных токов утечки в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью и устройство для его осуществления / В. П. Кононенко, Г. А. Леонтьев, В. Д. Оборотов и др. // SU 649081 А1. БИ № 7. 1979.
76. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 218 с.
77. Копылов, И.П. Математическое моделирование асинхронных машин / И.П. Копылов, Ф.А. Мамедов, В.А. Беспалов. – М.: Энергия, 1969.

78. Корицкий, Ю.В. Основы физики диэлектриков / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергия, 1979. – 248 с.
79. Королькова, В.И. Электробезопасность на промышленных предприятиях / В.И. Королькова. – М.: Машиностроение, 1970. – 552 с.
80. Коростелев, М.Е. Исследование электробезопасности в условиях подземных и открытых горных разработок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.281 / Коростелев Михаил Егорович. – М., МГИ, – 1971. – 23 с.
81. Кубрин, С.С. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт / С.С. Кубрин, А.А. Моисеевский, И.М. Закоршменный и др. // Уголь. – 2022. – № 2. – С. 4 – 9.
82. Куницкий, В.Г. Разработка устройства защитного отключения для шахтных участковых электрических сетей с частотно-регулируемым электроприводом напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Куницкий Виталий Григорьевич. – М., МГГУ, – 1996. – 23 с.
83. Лаевский, С.Г. Автоматизация управления электроснабжением шахт / С.Г. Лаевский, Н.П. Демченко, Ю.Г. Бацезев и др. – М.: Недра, 1992. – 296 с.
84. Лазарев, А.И. Разработка системы защитного отключения для шахтных электрических сетей напряжением до 1 кВ с частотно-регулируемым электроприводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Лазарев Андрей Иванович. – М.: МГГУ, – 1998. – 23 с.
85. Ларионов, В.Н. Исследование влияния параметров электрических сетей текстильных предприятий на пожароопасное искрообразование и разработка методов его предупреждения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ларионов Валерий Николаевич. – М., МЭИ, – 1978. – 20 с.
86. Ляхомский, А.В. Исследование условий и разработка мероприятий по обеспечению электробезопасности в контактных сетях электровозной откатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ляхомский Александр Валентинович. – М.: МГИ, 1977. – 242 с.
87. Манойлов, В.Е. Проблемы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – М., – Л.: Госэнергоиздат, 1961.

88. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов // – Л.: Энергия, 1976. – 342 с.
89. Масный, Я. Способ оценки риска поражения электрическим током в электроустановках напряжением до 1000 В / Я Масный // Докл. на Международной конференции "Электробезопасность-85", Казанлык, Болгария, 1985.
90. Мацкевич, И.П. Высшая математика. Теория вероятностей и математическая статистика / И.П. Мацкевич, Г.П. Свирид. – Минск: Высшая школа, 1993.
91. Машкин, А.Г. Разработка способов и средств обеспечения электробезопасности в рудничных электрических сетях напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Машкин Анатолий Геннадьевич. – М., МГИ, – 1987. – 140 с.
92. Машкин, А.Г. Способ защиты электрической сети от утечки тока на землю / А.Г. Машкин, Ю.Г. Бацезев, И.Ф. Суворов и др. // АС № 675512, БИ № 42. 1985.
93. Меньшов, Б.Г. К вопросу исследования электрического сопротивления тела человека в подземных горных условиях/ Б.Г. Меньшов. – М.: Труды МГИ, сб. № 19, 1957.
94. Меньшов, Б.Г. Состояние и пути снижения электротравматизма на Норильском горно-металлургическом комбинате / Б.Г. Меньшов, А.С. Маршалко, Э.Б. Альтшулер и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1985. – № 7, – С. 38 – 39.
95. Меньшов, Б.Г. Измерения проводимости и токов замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью / Б.Г. Меньшов, В.К. Шадинский // Электричество. – 1969, – № 4. – С. 44 – 45.
96. Миндели, Г.В. Влияние переходных процессов на электробезопасность / Г.В. Миндели // В кн.: Механизация и автоматизация в горной промышленности. – М.: Госгортехнадзор, 1960, – С.172 – 190.

97. Миндели, Г.В. Основы безопасного электроснабжения подземных разработок угольных шахт: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 173 / Миндели Гиви Валерианович. – М., ИГД им. А. А. Скочинского, – 1969. – 47 с.
98. Минин, Г.П. Реактивная мощность / Г.П. Минин. – М.: Энергия, 1978. – 88 с.
99. Муравьев В.П., Разгильдеев Г.И. Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок шахт / В.П. Муравьев, Г.И. Разгильдеев. – М.: Недра, 1970.
100. Найденов, А.И. Исследование предельно безопасных величин напряжений и токов в длительном и кратковременном режимах воздействия применительно к шахтным электрическим сетям: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Найденов Алексей Иванович. – М.: МГИ, – 1975, – 154 с.
101. Немцев, Г.А. Исследование и разработка способов и средств контроля условий электробезопасности при эксплуатации шахтных электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Немцев Геннадий Александрович. – М., МГИ, – 1981. – 178 с.
102. Новиков, А.М. Методологические проблемы современной науки / А.М. Новиков. – М.: Наука, 1978.
103. Новиков, А.М. Методология / А.М Новиков., Д.А. Новиков. – М.: Синтег, 2007.
104. Озерной, М.И. Переходные процессы в шахтной участковой электросети при коммутации асинхронных короткозамкнутых электродвигателей / М.И. Озерной, В.М. Фарович // Изв. вузов. Горный журнал. – 1969. – № 3. – С. 136 – 141.
105. Озерной, М, И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. – 5-е изд., перераб. и доп. / М. И. Озерной. – Москва : Недра, 1975. – 445 с.
106. Орлихин, А.П. Разработка и исследование методов измерения параметров изоляции шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.281 / Орлихин Александр Петрович . – М.: МГИ, 1970. – 16 с.

107. Орловский, И.А. Выбор элементов вентильной схемы измерения и контроля сопротивления изоляции в сетях 6 – 10 кВ / И.А. Орловский // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – № 9, – С. 102 – 106.
108. Паспорт специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы // Microsoft Word - ebb_28242857_3294722413_38
109. Персон, Р.С. Электрические сигналы в организме животных и человека / Р.С Персон, Е.Н. Тиелин // Электричество. – 1976. – № 6. – С. 1 – 12.
110. Петриченко А.А., Ликаренко А.Г., Омельченко А.В. концепция автоматической компенсации емкостных токов утечки в рудничных электрических сетях.// Электробезопасность. – 2015. – № 3.– С. 28 – 40.
111. Петров, Г.М. Контроль параметров изоляции электрических сетей промышленных предприятий с тяжелыми условиями эксплуатации / Г.М. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2004. – № 4. – С. 270 – 271.
112. Петров, Ю. И. Методологические вопросы анализа научного знания / Ю.И. Петров. – М.: Высшая школа, 1977. – 224 с.
113. Петров, А.В. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах / А.В. Петров, В.Е. Алексеев, М.А. Титов и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.
114. Петуров, В.И. Классификация способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью / В.И. Петуров // Электробезопасность. – 2008. – № 1. – С. 20 – 24.
115. Петуров, В.И. Исследование параметров сопротивления изоляции в городских распределительных электрических сетях напряжением 6-10 кВ (на примере г. Читы) / В.И. Петуров, Б.Ц. Дагбаев, И.П. Геласимов // «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования»: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Томск, ТПУ, 2010. – С. 51–52.

116. Петуров, В.И. Исследование и разработка способов и средств контроля параметров изоляции рудничных электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Петуров Валерий Иванович. – М., МГИ, – 1992. – 120 с.
117. Петуров, В.И. Классификация устройств контроля и защиты рудничных электрических сетей / В.И. Петуров // Энергетика и энергоэффективные технологии: сборник докладов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ЛГТУ. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – Ч. 1, – С. 37 – 41.
118. Петуров, В.И. Способ измерения параметров изоляции фаз в сетях с изолированной нейтралью / В.И. Петуров // Электробезопасность. – 1998. – № 1, – С. 9 – 12.
119. Петуров, В.И. Особенности использования трансформаторов тока нулевой последовательности при создании устройств контроля и защиты в рудничных электрических сетях / В.И. Петуров // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (приложение). Проблемы безопасности жизнедеятельности Забайкальского края. Т. 14. № 3. – СПб.: – Чита, 2009. – С. 143–146.
120. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
121. Постников, И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И.М. Постников. – Киев: Техника, 1966.
122. Правила безопасности в угольных шахтах. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2020. – 118 с.
123. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. – М.: Минэнерго РФ, 2022.
124. Правила устройства электроустановок. – М.: Минэнерго РФ, 2002.
125. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 2003г.

126. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом (ПБ 03-553-03). М.: НТЦ «промышленная безопасность», 2009. – 200 с.
127. Прудников, В.С. Устройство для автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки / В.С. Прудников, В.С. Дзюбан, А.П. Денисенко и др. // АС. № 493857. – БИ № 44. 1976.
128. Прудников, В.С. Устройство для автоматической компенсации емкостных токов утечки / В.С. Прудников, В.С. Дзюбан, А.И. Балошистов // АС. № 670998. – БИ № 24. 1979.
129. Прудников, В.С. Устройство для автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки / В.С. Прудников, В.С. Дзюбан, А.П. Денисенко и др. // АС. № 750647. – БИ № 27. 1980.
130. Прудников, В.С. Устройство для автоматической компенсации емкостных токов в электрических сетях с изолированной нейтралью / В.С. Прудников // АС. № 765921. – БИ № 35. 1980.
131. Прудников, В.С. Способ автоматической компенсации емкостного тока утечки / В.С. Прудников // АС. № 769676. – БИ № 37. 1980.
132. Прудников, В.С. Устройство для автоматической компенсации емкостного тока утечки / В.С. Прудников // АС. № 792438. – БИ № 48. 1980.
133. Прудников, В.С. Способ автокомпенсации емкостного тока утечки на землю в трехфазной электрической сети / В.С. Прудников // АС. № 884030. – БИ № 43. 1981.
134. Райзберг, Б.А. Современный экономический словарь / Б.А. Райзберг, Л.Ш. Лозовский, Е.Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 495 с.
135. Ракитов, А.И. Философские проблемы науки: Системный подход / А.И. Ракитов // – М.: Мысль, 1977. – 270 С.
136. Раух, Я.Я. Учет нагрузки при выбеге электродвигателей 6-10 кВ / Я.Я. Раух, А.И. Хитров, В.В. Кабанов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1985. – № 5. – С. 24 – 26.

137. Ревякин, А.И. Вопросы теории и практики защитного отключения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ревякин Александр Иванович. – М., МЭИ, – 1969. – 27 с.
138. Ревякин, А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А.И. Ревякин, Б.И. Кашолкин. – М.: «Энергия», 1980. – 160 с.
139. Ревякин, А.И. Применение графов в электробезопасности / А.И. Ревякин, А.И. Осинковский // – труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, вып.232, 1975. – С.10 – 20.
140. Реле утечки типа УАКИ-380 и УАКИ-660. Инструкция по монтажу и эксплуатации. Прокопьевский завод шахтной автоматики. – Прокопьевск: 1975. – 20 с.
141. Рузавин, Г.И. Методология научного исследования. Учеб. Пособие для вузов./ Рузавин Г.И. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999.
142. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192. с.
143. Рябушкин, Т.В. Общая теория статистики / Т.В. Рябушкин, М.Р. Ефимова, И.М. Ипатова и др. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 279 с.
144. Садовский, В.Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития / В.Н. Садовский. – М.: Наука, 1980г.
145. Садовский, В.Н. Системные исследования. Ежегодник / В.Н. Садовский. – М.: Наука, 1969 – 1983.
146. Садовский, В.Н. Философско-методологические исследования технических наук / В.Н. Садовский // Вопросы философии. – 1981. – № 10. – С. 172 – 180.
147. Сивокобыленко, В.Ф. Метод эквивалентирования и расчета короткого замыкания в системе асинхронных машин / В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков // Электричество. – 1979. – № 1. – С. 45 – 50.

148. Сивокобыленко В.Ф. Метод определения эквивалентных параметров машин переменного тока / В.Ф. Сивокобыленко, В.Б. Совпель, В.А. Павлюков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – № 2. – С.93 – 97.
149. Сивокобыленко, В.Ф. Режимы работы синхронных двигателей при кратковременных перерывах питания собственных нужд. Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС / В.Ф. Сивокобыленко. – М.: Энергия, 1968. – Вып. 35, с. 272 – 277.
150. Сивокобыленко. В.Ф. Использование аналоговых вычислительных машин для исследования режимов пуска и самозапуска электродвигателей собственных нужд блочных электростанций. Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС / В.Ф. Сивокобыленко, Я.А. Орейх. – М.: Энергия. 1968, – Вып. 35., С. 277 – 282.
151. Сивокобыленко, В.Ф. Расчет самозапуска электродвигателей с использованием многоконтурных схем замещения / В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков // Электрические станции. – 1976. – № 3. – С. 51 – 53.
152. Сивокобыленко, В.Ф. Математическое моделирование широкопазных асинхронных машин / В.Ф. Сивокобыленко, В.И. Костенко // Электричество. – 1980. – № 4. –С. 32– 36.
153. Сидоренко, И.Т. Устройство для автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки / И.Т. Сидоренко, С.В. Дзюбан // АС. № 1159106. БИ № 20. 1985.
154. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М., Высшая школа, 1980, – 176 с.
155. Солодовников, Р.С. Электробезопасность при работе на судах и под водой / Р.С. Солодовников. – Л.: Судостроение, 1996. –181 с.
156. ССБТ. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжения и токов через тело человека. – Введ. с измен. № 1, 1987-12. –М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1996, – 5с.
157. ССБТ. ГОСТ 12.1.009-76. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. Термины и определения. – М.: 1977.

158. ССБТ. ГОСТ 12.4.155-85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования. – М.: 1985.
159. Суворов, И.Ф. Исследование влияния переходных процессов на электробезопасность при эксплуатации рудничного электрооборудования напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Суворов Иван Флегонтович. – М.: МГИ, 1982.
160. Суворов, И.Ф. Результаты производственных исследований переходных процессов в цепи утечки через схему замещения тела человека / И.Ф. Суворов, А.Г. Машкин // Электробезопасность на открытых и подземных горных работах: тезисы докладов и сообщений III Всесоюзной научно-технической конференции. – Днепропетровск, 1982. – С. 331 – 333.
161. Суворов, И.Ф. Влияние ЭДС индивидуального выбега электродвигателя на исход электропоражения / И.Ф. Суворов // Деп. ЦНИИЭИуголь. – М.:1982, № 2432.
162. Суворов, И.Ф. Исследование влияния переходных процессов на условия электробезопасности в реальных рудничных электрических сетях 0,4 кВ / И.Ф. Суворов, Ю.Г. Бацезев // Деп. ЦНИИЭИуголь, №2433. – М.: 1982.
163. Суворов, И.Ф. Влияние конденсаторных установок на длительность остаточного напряжения / И.Ф. Суворов // В кн.: «Управление нормальными и аварийными режимами энергосистем и систем электроснабжения». – Чита, 1987. – С. 59 – 64.
164. Суворов, И.Ф. Степень компенсации реактивной мощности и ее влияние на условия электробезопасности при выбеге асинхронного электродвигателя / И.Ф. Суворов // Электробезопасность. – 2005. – № 4. – С. 28 – 37.
165. Суворов, И.Ф. Развитие теории и разработка способов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.26.01 / Суворов Иван Флегонтович. – Челябинск, Юж.- Ур. гос. ун-т, – 2006, – 457 с.

166. Суворов, И.Ф. Влияние ЭДС выбега на электробезопасность в низковольтных сетях / И.Ф. Суворов, В.И. Петуров, Д.А. Дейс. – Чита: ЧитГУ, 2008. – 120 с.
167. Суворов, И.Ф. Комплексные системы обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок до 1000 В / И.Ф. Суворов. – Чита: ЧитГУ, 2005. – 328 с.
168. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
169. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 1973.
170. Тонкошкур, Л.С. Исследование переходных процессов в оперативной цепи утечки реле САЗУ-2 / Л.С. Тонкошкур, А.Г. Ликаренко // В кн. «Электробезопасность на предприятиях горнорудной промышленности». – Кривой Рог, 1970, – С. 83 – 87.
171. Тонкошкур, Л.С. Устройство для групповой селективной защиты от утечек тока в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью / Л.С. Тонкошкур, А.Г. Ликаренко // АС. № 442543. БИ № 33, 1975.
172. Тоцкий, А.В. Исследование и разработка средств защиты при ненормальных режимах шахтных электроустановок: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Тоцкий Адольф Васильевич. – Днепропетровск, – ДГИ, 1975. – 182 с.
173. Тоцкий, А.В. Защита от электротравматизма в шахтных электроустановках / А.В. Тоцкий // Промышленная энергетика. – 1975. – № 9. – С. 31 – 33.
174. Физиология человека. Серия: Учебная литература для студентов медицинских вузов // Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. – М.: «Медицина», 2001.
175. Федоров А.И. Многофункциональное устройство защитного отключения трехфазных электроприемников / А.И. Федоров, Г.Ф. Горбачев, В.И. Щуцкий // Электро- и пожаробезопасность при эксплуатации электроустановок: тезисы

- докладов Всесоюзной научно-практической конференции. – Душанбе: ДНПО «Системаавтоматика», 1990, – С. 61 – 62.
176. Фурцев, М.Е. Исследование и разработка средств защиты от ЭДС, генерируемых отключаемыми от сети асинхронными двигателями в условиях горных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Фурцев Михаил Егорович. – Харьков, – 1966. – 18 с.
177. Хусаинов, Ш.Н. Улучшенный метод определения проводимостей изоляции участка сети, содержащего линию с отпайкой, по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Вып. 2. – 2002. – № 7, – С. 24 – 29.
178. Цапенко, Е.Ф. Режим нейтрали в сетях до 1000 Вольт с точки зрения безопасности: автореф дис. ... канд. техн. наук / Цапенко Евгений Федорович. – М., МЭИ. – 1957. – 14 с.
179. Цапенко, Е.Ф. Об опасности поражения электрическим током при переходных режимах / Е.Ф. Цапенко // Вестник промышленности. – 1969. – № 2.
180. Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В / Е.Ф. Цапенко. – М.: Высшая школа, 1972. – 152.
181. Цапенко, Е.Ф. Способ определения активного сопротивления изоляции и емкости сети относительно земли трехфазной сети с изолированной нейтралью / Е.Ф. Цапенко, Ю.Г. Бацезев, В.И. Петуров и др. // АС. СССР № 16917785, 1991.
182. Цапенко, Е. Ф. Теория и практика непрерывного контроля изоляции электроустановок до 1000 В: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.00.00 / Цапенко Евгений Федорович. – М., – 1969. – 399 с.
183. Цапенко, Е.Ф. Определение активного сопротивления изоляции и емкости сетей 6 – 35 кВ при помощи вольтметров контроля изоляции / Е.Ф. Цапенко, Ю.Н.Случевский, Д.Н. Чучелов // Промышленная энергетика. – 1982. – № 1. – С. 50 – 51.

184. Цапенко, Е.Ф. Определение параметров изоляции отдельных фазотносительно земли сетей 6 – 10 кВ карьеров / Е.Ф. Цапенко, А.С. Кудрявцев. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1985. – № 1. – С. 72 – 74.
185. Цапенко, Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей / Е.Ф. Цапенко, Л.И. Сычев, П.Н. Кулешов. – М.: Недра, 1988. – 213 с.
186. Цапенко, Е.Ф. Использование вольтметра для определения параметров изоляции фаз в сети с изолированной нейтралью до 1000 В / Е.Ф. Цапенко, Ю.Н. Случевский // Измерительная техника. – 1983. – № 2. – С. 33 – 35.
187. Цапенко, Е.Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях вследствие применения аппаратов защиты типа УАКИ, АЗАК, АЗШ, АЗУР / Е.Ф. Цапенко // ГИАБ. – 2000. – № 3. – С. 106 – 109.
188. Цапенко, Е.Ф. Состояние защиты от токов утечки на землю в шахтных сетях напряжением до 1200 В / Е.Ф. Цапенко // ГИАБ. – 2003. – № 63. – С. 155 – 156.
189. Чабан, В.И. Расчет группового выбега и разгона электрических машин / В.И. Чабан, В.Ф. Сивокобыленко // Электричество. – 1980. – № 3. – С. 59 – 60.
190. Чабан, В.И. К расчету переходных процессов в демпферных контурах электрических машин / В.И. Чабан // Электричество. – 1978. – № 6. – С. 39 – 41.
191. Чепайкина, Т. А. Снижение электротравматизма на угольных предприятиях в условиях вечной мерзлоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Чепайкина Татьяна Алексеевна. – Нерюнгри: 2005. – 154 с.
192. Шаякберов, Н.Ш. Селективная защита поврежденных участков сети при малых токах замыкания на землю. / Н.Ш. Шаякберов // В кн. «Электробезопасность на предприятиях горнодобывающей промышленности». – М.: Недра, 1965.
193. Шишкин, Н.Ф. Критерии оценки электробезопасности в сетях с быстродействующей аппаратурой напряжением до 1000 В / Н.Ф. Шишкин, Б.М. Ягудаев, В.Ф. Антонов и др. – М.: Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, 1973. Вып. 112, – С. 3 – 15.
194. Шуп Терри. Решение инженерных задач на ЭВМ /Терри Шуп. – М.: Мир, 1982. – 235 с.

195. Щуцкий, В.И. Исследование некоторых аспектов проблемы электробезопасности в горной промышленности СССР: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.281 / Щуцкий Виталий Иванович. – М., – 1970. – 433 с.
196. Щуцкий, В.И. Безопасность обслуживания электроустановок углеобогачительных фабрик / В.И. Щуцкий, В.Н Ахлюстин. – М.: Недра, 1979. – 259 с.
197. Щуцкий, В.И. Защитное отключение электроустановок / В.И. Щуцкий, О.Н. Беляustin, А.А. Буралков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
198. Щуцкий, В.И. Исследование электрических параметров тела человека импульсом напряжения прямоугольной формы / В.И. Щуцкий, В.Л. Бузовкин // В кн.: «Электробезопасность на предприятиях горнорудной промышленности». – Кривой Рог: 1970. – С.142 – 146.
199. Щуцкий, В.И. К вопросу о схеме замещения электрических параметров тела человека / В.И. Щуцкий, В.Л. Бузовкин // В кн.: Электробезопасность на предприятиях горнорудной промышленности. – Кривой Рог: 1970. – С. 138 – 142.
200. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. –М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
201. Щуцкий, В.И. Электротравматизм на горнорудных предприятиях черной металлургии / В.И. Щуцкий, А.А. Каймаков, М.Е. Коростелев // Труды ВостНИИ. – Кемерово, 1971. т. ХУ11. – С. 49 – 67.
202. Щуцкий, В.И. Исследование электробезопасности методами аналогового моделирования / В.И. Щуцкий, К.Е. Ким // Изв. вузов. Горный журнал. – 1974. – № 1. – С. 128 – 133.
203. Щуцкий, В.И. Исследование влияния несимметрии параметров изоляции электрических сетей напряжение до 1000 В. на условия электробезопасности / В.И. Щуцкий, К.Е. Ким // В кн.: «Режимы работы систем электроснабжения и электроприводов». – Павлодар; 1974. – С. 18 – 22.

204. Щуцкий, В.И. Условия электробезопасности в сетях с вентильными схемами защитного отключения / В.И. Щуцкий, К.Е. Ким // В сб.: «Проблемы охраны труда». – Казань, 1974. – С. 207 – 208.
205. Щуцкий В. И., Костарев А. П., Ляхомский А. В. Электротравматизм на угольных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. – 1978. – № 2. – С. 47 – 50.
206. Щуцкий, В.И. Электротравматизм на горнорудных предприятиях черной металлургии / В.И. Щуцкий, М.Е. Коростелев // – В кн.: «Электробезопасность на предприятиях горнорудной промышленности». – Кривой Рог, 1970 – С. 13 – 24.
207. Щуцкий, В.И. Электробезопасность на открытых горных разработках / В.И. Щуцкий, М.Е. Коростелев // Добыча угля открытым способом. – 1972. – № 5. – С. 15 – 16.
208. Щуцкий, В.И. Электротравматизм на рудниках и карьерах цветной металлургии/ В.И. Щуцкий, М.Е. Коростелев, С.А. Израитель // Безопасность труда в промышленности. – 1970. – № 3, – С. 27 – 32.
209. Щуцкий, В.И. Анализ электротравматизма на шахтах и карьерах черной металлургии / В.И. Щуцкий, М.Е. Коростелев, С.А. Израитель // Горный журнал. – 1970. – № 9, – С. 65 – 68.
210. Щуцкий, В.И. Анализ причин электротравматизма при эксплуатации электроустановок угольных шахт / В.И. Щуцкий, М.Е. Коростелев, Г.И. Капелюшников // Безопасность труда в промышленности. – 1970. – № 7. – С. 54 – 58.
211. Щуцкий, В.И. Электробезопасность на открытых горных работах / В.И. Щуцкий, А.М. Маврицын, А.И. Сидоров и др. – М.: Недра, 1983.
212. Щуцкий, В.И. Электрификация подземных горных работ. Учебник для вузов / В.И. Щуцкий, Л.А. Плащанский, Н.И. Волощенко. – М.: Недра, 1979. – 259 с.
213. Щуцкий, В.И. Эффективность компенсации емкостных токов утечки/ В.И. Щуцкий, В.С. Прудников, В.И. Гайдашев // Безопасность труда в промышленности. – № 8. – 1986. – С. 31 – 32.

214. Щуцкий, В.И., Причины электротравматизма в сетях 6 кВ промышленных предприятий / В.И. Щуцкий, В.И. Петров // Безопасность труда в промышленности. – 1969. – № 9. – С. 143 – 148.
215. Щуцкий, В.И. К вопросу о допустимых токах/ В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин // Промышленная энергетика. – 1978. – № 12. – С. 32 – 33.
216. Щуцкий, В.И. Электробезопасность на открытых горных работах / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин и др. – М.: Недра, 1996.
217. Щуцкий В.И. Математическая модель процесса воздействия электрического тока на нервную систему человека / В.И. Щуцкий, М.Я. Хакел // Докл. на Междунар. конф. «Электробезопасность-85», Казанлык. – Болгария, 1985.
218. Юдин, Э.Г. Системный подход и принцип деятельности / Э.Г. Юдин. – М.: Высшая школа, 1978.
219. Ягудаев, Б.М. Исследование и разработка критериев электробезопасности в сетях горных предприятий с быстродействующей защитной аппаратурой напряжением 1,14 – 10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Ягудаев Борис Михайлович. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, – 1974. – 16 с.
220. Янке, Э. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Э. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1977.
221. Dalziel C.F., Lee W.R. Letal electric currents. "IEEE. Spectrum", 1968, vol. 6, № 2, p. 44 – 45.
222. J. Kano Murga. Electricity. The danger of its use and protection of people from electric shock. MF. Per. GPNTB, "Instalador", No. 106, 1976, pp. 75 – 78.
223. Hryniewicz, J., Układ zastępczy impedancji ciała człowieka do analizy prądów rażenia w sieciach okrętowych. / J. Hryniewicz, E. Koś, Krasucka E.// "PRZ.Electrotechn", 1982, v. 58, № 8 – 9.
224. Koeppen S., Tolazzi H. Elektrounfälle und ihre Einflussgrößen aus medizinischen Sicht. "ETZ-Bulletin", 1966, Bd.18, № 6, s. 79 – 92.
225. Thielen H. Wirkungsbereiche von Körperströmen und ihre Schutzwirkungen auf Schutzmaßnahmen. "ETZ-A", 1974, B 26, № 6, s. 155 – 160.
226. Les dangers de l'électrification. "Mesures", 1983, v. 48, № 8, p. 49 – 51.

227. Ollendorff F., Elementare Ansätze zu einer Theorie des elektrischen Schlages – “Archiv für Elektrotechnik”, 1978, v.60, № 2, s. 111 – 120.
228. Osypka P. Messtechnische Untersuchungen über Stöße, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. “Elektromedizin”, 1963, B 1.8, № 3, s. 113 – 127.
229. Ronai B., Hazzaszolas E.J. “A villamos balesetek elhárítása” című cikkez. “Villamosság”, 1955, № 9, p. 56 – 58.
230. Smith H.R. Electric shock and sensitive earthleakage protection. “The certificated Engineer”, 1966, Vol.39, № 1, p. 26 – 32.
231. Teresiak Z. Modelowanie zagrożenia człowieka w technice ochrony przeciwporażeniowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, nr 1968.
232. Teresiak Z. Podstawowe kryteria skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu ponad 1 kV. Wrocław, 1975.
233. Procédé et dispositif pour la protection automatique des réseaux de distribution dits à neutre isolé ou impédant. Franc. № 1396514, 1965.
234. Krivan F. An earth leakage protection circuit. Gr. Br. № 1018815, 1965.
235. Faulkner E.T. Earth leakage systems applied to coalmining in Australia. – The mining electrical and mechanical engineer, 1977. – v. 39, № 10.
236. Pouvel I. Problèmes de protection dans les réseaux miniers. – Revue de l’industrie minière, 1983. – v. 25, № 7.
237. Perfectionnements aux procédés et dispositifs d’injection de courant de surveillance dans les réseaux électriques. Franc. № 1231721, 1964.
238. Kupfer J., Bastek R., Eggert S. Grenzwerte zur Vermeidung von Unfällen durch elektrischen Strom mit tödlichem Ausgang. Z. gesamte Hyg. – 1981. – № 1 – p. 56 – 59.
239. Biegelmeier G. Body impedance of living Human beings for alternating current 50 c/s. Bulletin.Int.Sek. IVSS Verhüt Arbeitsall und Dufersfhrh Elek, 1980.

240. Determination of the Dielectric Characteristics of Electric Equipment Insulation in the Presence of Utility-Frequency Interference Currents, Shinkarenko, G.V., Power Technology and Engineering, 50(3), c. 341 – 346, 2016.
241. Diagnosis of inhomogeneous insulation degradation in electric cables by distributed shunt conductance estimation, Zhang, Q., Tang, H., Control Engineering Practice 21(9), c. 1195 – 1203, 2013.
242. Insulation status mobile monitoring for power cable based on a novel fringing electric field method, Liang, M.-Y., Dian, S.-Y., Liu, T., Lecture Notes in Electrical Engineering 138 LNEE, c. 987 – 994, 2012.
243. Using ultraviolet imaging method to detect the external insulation faults of electric device, Zang, C., Ye, H., Lei, H., (...), He, S., Zhao, X., Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 5377769, c. 26 – 30, 2009.
244. A. Xie, X. Zheng, S. Li, and G. Chen, “Structures and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation,” High Voltage Engineering, vol. 14, no. 6, pp. 168 – 173, 2007.
245. Y. Yang, D. M. Hepburn, C. Zhou, W. Zhou, and Y. Bao, “Online monitoring of relative dielectric losses in cross-bonded cables using sheath currents,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 5, pp. 2677 – 2685, 2017.
246. Paul O’shea/ Counteracting High Leakage Currents/
<https://www.powerelectronicsnews.com/counteracting-high-leakage-currents/>
247. Пичуев, А.В. Влияние переходных процессов на условия электробезопасности / Ю.Г. Бацеев, А.В. Пичуев // Сб. докл. Междунар. конф. «Электробезопасность-85». – Болгария, Казанлык, 1985, – 8 с.
248. Пичуев А.В. Влияние переходных процессов в рудничной сети на опасность поражения человека/ А.В. Пичуев // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – № 11. – 3 с.

249. Пичуев, А.В. Проблемы управления электробезопасностью в электроустановках горнодобывающих отраслей / А.В. Пичуев, В.И. Щуцкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 1997. – № 2. – С. 55 – 67.
250. Пичуев, А.В. Математическое моделирование режимов утечки тока в электрических сетях с изолированной нейтралью / А.В. Пичуев, А.В. Брюханцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 266 – 268.
251. Пичуев, А.В. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов // Успехи научного естествознания. – 2010. – № 2. – С. 114.
252. Пичуев, А.В. Классификация средств технического контроллинга электробезопасности / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №1. – С. 383 – 385.
253. 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.
254. 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.
255. Пичуев, А.В. Параметрические зависимости сопротивления изоляции рудничных участков электрических сетей / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – С. 398 – 400.
256. Пичуев, А.В. Методологические аспекты системного анализа электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 5. – С. 352 – 355.
257. Пичуев, А.В. Системный анализ электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Сб. научн. трудов. «Электрификация и

- энергоэффективность». Тематическое приложение. – ГИАБ – 2011. – С. 319 – 321.
258. Пичуев, А.В. Системный подход в решении проблемы электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Сб. научн. трудов. «Электрификация и энергоэффективность». Тематическое приложение. – ГИАБ. – 2011. – С. 370 – 372.
259. 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.
260. Пичуев, А.В. Методологические аспекты системного анализа электробезопасности на горных предприятиях России / А.В.Пичуев, А.В. Ляхомский // Приложение ГИАБ – М.: Сб. научн. трудов МГГУ «Неделя горняка-2013». Приложение ГИАБ. – 2013, – С. 486 – 494.
261. Пичуев, А.В. Принципы системного подхода к анализу электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев, А.В. Ляхомский // Горный информационно-аналитический бюллетень.–. 2016. – № 3. – С. 85 – 92.
262. Пичуев, А.В. Требования нормативных документов к взрывозащищенному электрооборудованию предприятий с подземной разработкой месторождений полезных ископаемых / А.В. Ляхомский, И.А. Герасимов, А.В. Пичуев // ГИАБ. – 2019. – № 11. – С. 216 – 231.
263. Пичуев, А.В. Контроллинг электробезопасностью в электроустановках / А.В. Пичуев, В.И. Щуцкий // Электробезопасность. – 1997. – № 1. – С. 45 – 47.
264. 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.
265. Пичуев, А.В. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при генерировании электродвигателями обратной ЭДС / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2010. – № 4. – С. 19 – 23.

266. Пичуев, А.В. Результаты корреляционного анализа влияния обратной ЭДС выбега электродвигателей на электробезопасность. // Электробезопасность. – 2011. – № 1. – С. 39 – 42.
267. Пичуев, А.В. Режимы несимметричной утечки тока через изоляцию рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2011. – № 2. – С. 28 – 33.
268. Пичуев, А.В. Опасность электропоражения при несимметрии параметров изоляции рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2011. – № 3. – С. 32 – 41.
269. Пичуев, А.В. Параметры изоляции электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2011 – № 4. – С. 22 – 28.
270. Пичуев, А.В. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов. – Чита: РИК ЧитГУ. – 2009. – 268 с.
271. 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.
272. Пичуев, А.В. Система управления электробезопасностью на горных предприятиях / А.В. Пичуев, С.М. Карпенко. – М.: МИЭЭ. – 2019. – 224 С.
273. 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.
274. 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.
275. 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. – Бюл. № 33 от 25.11.2022.

276. 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.
277. Пичуев, А.В. Методика оценки участков электрических сетей шахт и рудников по условиям электробезопасности / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, Ю.Г. Бацезев // Тезисы докладов Международной конференции «Электробезопасность-90». – Болгария. – Варна. – 1990. – С. 58 – 60.
278. Пичуев, А.В. Метод контроля изоляции для подсистемы электробезопасности АСУЭШ / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции «Электро- и пожаробезопасность при эксплуатации электроустановок». – Душанбе. – 1990. – С. 10 – 11.
279. 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.
280. 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.
281. 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.
282. 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.
283. 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.
284. Пичуев, А.В. Средства технического контроллинга электробезопасности / А.В. Пичуев // Сб. научн. трудов "Энергетика в современном мире", IV Всероссийская научно-практическая конференция, т.1. – Чита: ЧитГУ. – 2009. – С. 75 – 80.
285. 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. научн. Трудов. – Чита.– 2011.– С. 143–147.
286. 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. научн. трудов. – Чита.– 2011.– С. 148 – 152.
287. 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. научн. трудов. – Чита.– 2011.– С. 133–136.
288. Пичуев, А.В. Оценка опасности поражения человека электрическим током при несимметрии фазных напряжений в рудничной участковой электрической сети. / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // XI Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения», Сб. научн. трудов. – Чита.– 2011.– С. 136 – 138.

289. Пичуев, А.В. Компенсация емкостных токов утечки в низковольтных электрических сетях в условиях неявно выраженного резонанса / А.В. Пичуев // Сб. докл. XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск; ТПУ. – 2012. – 3 с.
290. Пичуев, А.В. Влияние низкочастотных поляризаций на величину тока утечки в изоляции электрической сети напряжением до 1 кВ / А.В. Пичуев // Сб. докл. XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск; ТПУ, 2012.
291. 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, – 6 с.
292. Пичуев, А.В. Некоторые аспекты системного подхода к проблеме управления электробезопасностью на горных предприятиях / А.В. Пичуев, А.В. Ляхомский // V Международная научно-практическая конференция «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии». – Челябинск, 2012, – 6 с.
293. *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. C. 600 – 604.*
294. *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. C. 605 – 612.*
295. *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>.*

296. Pichuev, A.V. *Studying the Quality of Electric Power at a Tunneling Machine During the Construction of the Underground System* // V.V. Martyshkin, O.S. Gribkova, A.V. Pichuev // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, 2022, pp. 294 – 298 // DOI:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787259.
297. Pichuev, A.V. *Improving energy performance in networks with semiconductor converters.* / Y.V. Shevyrev, A.V. Pichuev, N.Y. Shevyreva // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, 2019, 8743020. // DOI:10.1109/ICIEAM.2019.8743020.
298. Пичуев, А.В. Программа расчета режимов утечки тока через изоляцию при проектировании рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662614. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 16.10.2020.
299. 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.
300. 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.
301. 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. Шевырѐв, Н.Ю. Шевырева // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617964 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 17.04.2023.

302. 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.
303. 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.
304. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ П1

Таблица П1.1 – Режим однофазной утечки тока через изоляцию $C_A = C_B = C_C$ (начало)

$C_A = C_B = C_C$, мкФ	R_A , кОм	$R_B = R_C$, кОм	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,1	10,5	31,5	425,1	77,9	682,6	238,5	834,3	341,7	231,6	312,9
		60	430,0	66,5	692,0	247,1	932,7	338,8	327,2	318,7
		120	431,1	55,1	696,1	249,9	1001,8	338,8	392,5	324,5
		180	432,0	52,2	705,3	244,2	1026,8	335,9	406,9	324,5
		300	443,8	49,3	708,5	255,7	1048,9	335,9	436,3	327,3
	31,5	60	603,1	83,7	615,6	227,1	723,8	338,8	99,1	338,8
		120	602,6	80,8	583,6	232,7	783,7	347,4	158,4	347,4
		180	616,9	78	572,4	235,6	804,5	344,5	180,6	350,3
		300	629,9	77,9	562,7	235,6	824,0	347,4	199,8	353,1
	60	120	639,2	89,4	616,2	224,1	694,7	347,4	70,2	355,9
		180	647,8	83,7	604,4	224,1	715,8	347,4	92,4	358,9
		300	660,0	83,7	599,3	224,1	735,1	347,4	112,4	358,9
	120	180	648,8	92,3	680,8	218,4	660,0	347,4	35,6	364,6
		300	657,9	89,4	631,0	221,3	678,9	347,4	55,8	364,6

Таблица П1.1 –Режим однофазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C,$ мкФ	$R_A,$ кОм	$R_B = R_C,$ кОм	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
0,3	10,5	31,5	616,2	80,8	594,1	229,9	766,8	344,5	141,5	345,7
		60	619,5	78,0	573,2	232,7	805,8	347,4	180,7	350,3
		120	636,5	75,1	560,6	235,6	826,6	347,4	204,8	353,1
		180	644,0	72,3	556,2	235,6	837,2	347,4	213,2	355,9
		300	650,8	72,4	553,7	235,6	843,8	347,4	220,3	358,9
	31,5	60	656,0	85,6	628,3	221,3	676,1	347,4	51,9	361,7
		120	669,6	85,6	621,8	221,3	700,6	344,5	78,6	364,6
		180	676,4	85,6	620,1	221,3	711,3	347,4	88,4	370,3
		300	682,6	89,4	619,7	221,3	718,8	344,5	100,0	367,4
	60	120	662,5	89,4	639,2	219,8	663,6	350,3	39,5	367,5
		180	666,4	90,9	638,4	219,8	673,5	344,5	49,9	370,3
		300	673,0	90,9	638,3	221,3	682,2	347,4	59,1	370,3
	120	180	657,8	92,3	644,8	218,4	655,8	345,7	23,8	370,3
		300	662,5	92,3	644,6	218,4	656,8	345,7	32,6	373,2

Таблица П1.1 –Режим однофазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C,$ мкФ	$R_A,$ кОм	$R_B = R_C,$ кОм	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
0,5	10,5	31,5	645,6	83,7	601,4	227	725,2	347,4	100,7	361,7
		60	661,4	83,7	591,4	227	750,3	347,4	127,5	358,9
		120	674,2	83,7	587,6	227	766,2	347,4	144,0	361,7
		180	678,1	83,7	586,7	227	771,9	350,3	149,8	361,7
		300	683,5	83,7	586,2	227	776,5	347,4	161,2	362,9
	31,5	60	655,9	85,4	637,8	221,3	664,2	345,7	40,4	365,7
		120	668,3	85,4	636,3	221,3	682,2	345,7	58,8	366,3
		180	673,1	85,4	636,2	221,3	688,7	345,7	65,9	370,3
		300	677,5	92,3	636,8	221,3	694,4	347,4	80,3	370,3
	60	120	660,7	92,3	643,6	219,6	655,8	345,7	31,6	372,1
		180	664,3	92,3	643,9	219,6	662,5	345,7	38,5	373,2
		300	667,7	92,3	644,2	219,6	668,1	345,7	44,3	373,2
	120	180	656,5	93,4	645,8	218,4	645,4	344,5	19,7	373,2
		300	661,4	93,4	464,0	218,4	650,7	345,7	26,1	373,2

Таблица П1.1 – Режим однофазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C$, мкФ	R_A , кОм	$R_B = R_C$, кОм	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
1,0	10,5	31,5	665,6	86,5	626,6	221,3	689,4	347,8	66,5	367,5
		60	676,9	87,7	625,2	221,3	705,1	347,9	83,2	367,5
		120	684,1	87,1	625,4	221,3	715,6	347,9	93,9	368,6
		180	686,8	87,1	625,7	224,1	719,7	344,5	97,7	368,6
		300	679,6	87,7	626,0	224,1	722,6	347,9	100,4	368,6
	31,5	60	658,5	86,5	644,5	219,5	653,1	345,7	30,0	373,2
		120	664,7	86,5	644,6	219,5	664,2	345,7	40,4	373,2
		180	667,8	86,5	644,7	218,4	699,9	345,7	44,3	373,2
		300	668,9	86,5	644,9	218,4	671,2	347,9	47,5	273,2
	60	120	656,4	86,5	647,9	218,4	648,8	345,7	20,8	374,3
		180	660,8	86,5	650,3	218,4	653,1	345,7	26,5	374,3
		300	662,5	86,5	647,3	218,4	655,2	347,9	30,8	374,3
	120	180	656,4	86,5	647,1	218,4	641,9	347,9	17,2	374,3
		300	657,9	86,5	647,9	218,4	646,6	347,9	17,5	374,3

Таблица П1.1 – Режим однофазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C$, мкФ	R_A , кОм	$R_B = R_C$, кОм	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
1,5	10,5	31,5	655,8	95,2	636,5	221,3	677,1	344,5	53,5	367,5
		60	671,2	95,2	636,6	221,3	689,2	347,4	66,0	368,6
		120	679,5	92,3	637,2	224,1	696,3	347,4	73,5	370,3
		180	681,8	86,6	637,5	224,1	698,9	353,1	76,2	370,3
		300	683,2	86,6	637,8	221,3	714,8	353,1	76,4	370,3
	31,5	60	657,1	86,6	646,0	218,4	650,5	345,7	25,2	373,2
		120	661,4	86,6	646,1	218,4	657,4	345,7	32,9	374,3
		180	662,9	93,4	646,4	218,4	660,0	345,7	35,5	376,0
		300	664,2	93,4	647,1	218,4	662,0	345,7	37,7	376,0
	60	120	655,2	86,6	647,2	218,4	646,2	344,5	22,1	376,0
		180	656,6	86,6	647,5	218,4	648,6	344,5	22,5	374,3
		300	657,9	86,6	647,1	218,4	650,1	344,5	25,6	374,3
	120	180	654,6	95,2	646,8	218,4	645,2	344,5	16,2	376,0
		300	654,6	95,2	647,5	218,4	645,2	345,7	16,4	376,0

Таблица П1.2 –Режим двухфазной утечки тока через изоляцию (начало)

$C_A = C_B = C_C$ мкФ/фазу	R_A кОм/фазу	$R_B = R_C$ кОм/фазу	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
0,1	300	10,5	904,4	100,9	679,6	192,7	427,2	367,5	290,9	120,9
		31,5	748,0	103,8	712,5	206,9	460,8	347,4	173,4	149,6
		60	670,3	102,6	684,1	212,7	531,1	344,5	93,3	166,8
		120	643,4	96,9	650,3	215,5	581,3	344,5	39,3	178,3
		180	641,7	95,7	639,2	215,5	600,4	344,5	23,5	181,1
	180	10,5	895,9	100,9	665,4	195,5	433,3	367,5	281,5	119,8
		31,5	750,7	103,8	702,5	206,9	475,4	347,5	159,5	149,6
		60	667,9	99,2	674,3	212,7	546,5	344,5	80,3	166,8
		120	645,2	95,2	642,2	215,5	598,2	344,5	28,5	177,1
	120	10,5	885,7	100,9	660,7	195,5	440,6	366,3	222,3	119,8
		31,5	730,2	102,6	686,2	201,2	492,6	347,4	152,9	149,6
		60	663,9	98,0	662,2	212,7	565,1	344,5	63,8	163,9
	60	10,5	855,9	100,9	648,4	198,3	462,0	361,7	238,2	118,1
		31,5	700,2	98,0	662,3	212,7	541,9	347,4	86,0	145,0

Таблица П1.2 – Режим двухфазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C$ мкФ/фазу	R_A кОм/фазу	$R_B = R_C$ кОм/фазу	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
0,3	300	10,5	758,2	103,8	723,1	205,8	446,1	347,4	187,3	151,3
		31,5	648,6	98,0	668,3	215,5	549,8	344,5	63,8	177,1
		60	640,3	95,2	650,0	217,3	580,6	344,5	31,2	184,0
		120	645,6	93,5	634,8	218,4	601,7	344,5	18,0	186,9
		180	649,7	92,3	633,1	218,4	610,5	344,5	15,3	186,9
	180	10,5	755,7	103,8	719,5	206,9	451,2	347,4	182,7	151,3
		31,5	650,4	98,0	665,7	215,5	555,7	344,5	62,5	175,4
		60	642,7	96,9	593,2	217,3	587,5	344,5	28,7	184,0
		120	649,2	92,3	633,9	218,3	609,4	344,5	16,4	186,8
	120	10,5	752,4	103,8	714,7	205,8	457,3	347,4	176,8	151,3
		31,5	651,1	98,0	662,3	215,5	562,1	344,5	56,1	175,4
		60	645,6	95,2	640,5	218,4	595,7	344,5	25,6	181,1
	60	10,5	742,4	102,5	702,6	206,9	475,4	347,5	159,5	149,6
		31,5	651,9	98,0	586,7	189,7	572,3	344,5	42,1	175,4

Таблица П1.2 – Режим двухфазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C$ мкФ/фазу	R_A кОм/фазу	$R_B = R_C$ кОм/фазу	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
0,5	300	10,5	688,1	100,9	704,1	209,8	499,4	344,5	123,7	163,9
		31,5	649,5	100,9	649,2	215,5	571,5	344,5	37,1	181,1
		60	640,7	92,3	636,5	217,3	592,5	344,5	20,9	186,9
		120	640,5	83,7	632,2	218,4	607,5	344,5	14,0	186,9
		180	644,4	83,7	632,3	218,4	613,3	344,5	14,4	186,9
	180	10,5	687,7	100,9	750,3	215,5	502,5	344,5	121,1	163,9
		31,5	636,9	100,9	647,5	215,5	575,5	344,5	34,6	181,1
		60	638,3	100,9	636,4	218,4	597,2	344,5	20,1	184,0
		120	650,1	92,3	621,0	206,9	612,5	344,5	14,8	186,9
	120	10,5	686,9	100,9	698,9	209,8	506,4	344,5	117,8	163,9
		31,5	638,4	100,9	646,6	215,5	580,5	344,5	33,9	181,1
		60	645,6	92,3	635,6	218,4	602,7	344,5	18,7	184,0
	60	10,5	684,8	100,9	691,7	212,5	518,0	344,5	108,0	163,9
		31,5	641,9	100,9	641,9	217,3	594,6	344,5	27,4	181,1

Таблица П1.2 – Режим двухфазной утечки тока через изоляцию (продолжение)

$C_A = C_B = C_C$ мкФ/фазу	R_A кОм/фазу	$R_B = R_C$ кОм/фазу	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
1,0	300	10,5	643,2	95,2	665,9	215,5	549,8	344,5	59,6	178,3
		31,5	641,4	95,2	636,4	217,3	590,4	344,5	20,9	186,9
		60	647,1	96,9	633,4	218,4	610,1	344,5	15,9	186,9
		120	640,4	103,7	632,5	218,4	610,3	344,5	14,3	186,9
		180	653,3	95,2	632,5	218,4	626,7	344,5	14,0	186,9
	180	10,5	643,8	95,2	665,3	215,5	551,6	344,5	58,7	178,3
		31,5	642,5	95,2	636,7	218,4	592,4	344,5	20,4	186,9
		60	648,3	95,2	633,3	218,4	612,6	344,5	14,0	186,9
		120	652,9	95,2	632,7	218,4	621,6	344,5	13,8	186,9
	120	10,5	644,5	95,2	664,3	215,5	553,9	344,5	57,3	178,3
		31,5	643,9	95,2	636,5	218,4	595,8	345,7	19,8	186,9
		60	650,1	95,2	633,4	218,4	616,3	345,7	15,2	186,9
	60	10,5	646,5	95,2	661,7	215,5	560,8	345,7	54,2	178,3
		31,5	647,7	95,2	635,6	218,4	607,2	345,7	18,2	186,9

Таблица П1.2 – Режим двухфазной утечки тока через изоляцию (окончание)

$C_A = C_B = C_C$ мкФ/фазу	R_A кОм/фазу	$R_B = R_C$ кОм/фазу	$U_{FA},$ В	$\varphi_A,$ град.	$U_{FB},$ В	$\varphi_B,$ град.	$U_{FC},$ В	$\varphi_C,$ град.	$U_0,$ В	$\varphi_0,$ град.
1,5	300	10,5	636,6	95,2	650,3	215,5	567,4	344,5	38,5	182,9
		31,5	643,1	95,2	634,3	217,3	598,4	344,5	17,0	186,9
		60	648,0	95,2	632,9	218,4	608,4	344,5	14,7	186,9
		120	651,4	95,2	631,7	218,4	621,1	344,5	14,0	186,9
		180	652,6	95,2	632,7	218,4	625,3	344,5	13,9	186,9
	180	10,5	635,8	95,2	650,1	215,5	568,3	344,5	37,9	183,9
		31,5	646,1	95,2	634,3	215,5	600,1	344,5	17,0	186,9
		60	648,8	95,2	632,9	218,4	614,4	344,5	14,6	186,9
		120	652,3	95,2	632,7	218,4	621,1	344,5	14,0	186,9
	120	10,5	637,9	95,2	649,7	215,5	570,6	344,5	37,4	183,9
		31,5	645,1	95,2	634,3	218,4	609,6	344,5	17,7	186,9
		60	650,0	95,2	633,0	215,5	617,5	344,5	14,4	186,9
	60	10,5	634,6	95,2	648,4	215,5	575,8	344,5	35,7	183,9
		31,5	647,9	95,2	632,9	218,4	608,3	344,5	16,0	186,9

Таблица П1.3 – Режим утечки тока через тело человека при симметрии параметров изоляции сети относительно земли

C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	T_H , рад/с	T_I , рад/с	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,1	10,5	34,88	3,033	153,5	142,8	77,9	902,5	250,0	953,8	318,7	487,1	287,2
	31,5	32,86	1,011	79,5	73,9	55,1	990,1	250,0	1025,5	318,7	566,3	287,2
	60	32,38	0,531	65,7	61,4	35,0	1008,0	250,0	1046,8	318,7	588,7	287,2
	120	32,11	0,265	61,6	57,4	20,6	1019,0	250,0	1069,0	318,7	603,2	287,2
	180	32,03	0,177	61,1	56,9	14,9	1023,0	250,0	1076,0	318,7	607,9	287,2
	300	31,95	0,106	60,6	54,0	9,2	1026,0	250,0	1079,0	318,7	611,2	287,2
0,3	10,5	11,63	1,011	199,3	185,6	57,9	883,0	250,0	977,0	324,4	477,8	295,8
	31,5	10,95	0,337	171,7	160,0	32,1	929,3	255,7	1082,0	324,4	542,5	295,8
	60	10,79	0,177	172,2	160,5	26,3	942,5	255,7	1009,8	324,4	565,0	295,8
	120	10,71	0,085	174,6	160,1	23,5	950,4	255,7	1095,0	324,4	579,5	295,8
	180	10,68	0,059	175,8	163,5	20,6	953,0	255,7	1099,6	324,4	582,1	295,8
	300	10,65	0,035	177,4	164,6	17,8	955,7	255,7	1102,0	324,4	586,1	295,8
0,5	10,5	6,98	0,607	262,5	244,3	55,0	829,0	250,0	992,6	327,3	449,9	307,3
	31,5	6,57	0,292	263,5	245,3	34,9	855,3	255,7	1063,9	327,3	517,4	307,3
	60	6,48	0,106	269,7	252,1	34,9	863,3	261,4	1058,9	327,3	535,9	307,3
	120	6,42	0,053	274,3	255,3	26,4	867,8	261,4	1096,0	327,3	546,5	307,3
	180	6,41	0,035	276,2	257,1	26,4	869,2	261,4	1100,0	327,3	550,4	307,3
	300	6,39	0,021	277,7	258,5	26,4	870,3	261,4	1105,0	327,3	554,4	307,3

Таблица П1.3 – Режим утечки тока через тело человека при симметрии параметров изоляции сети относительно земли (окончание)

C_L , мкФ/фазу	R_L , кОм/фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,7	10,5	4,98	0,433	324,9	302,3	52,2	773,0	261,4	992,6	330,2	427,0	310,1
	31,5	4,69	0,144	341,9	318,1	40,7	782,2	261,4	1055,3	333,1	482,5	313,0
	60	4,62	0,076	351,0	326,7	37,8	784,2	261,4	1072,3	333,1	498,7	313,0
	120	4,59	0,038	354,6	331,7	37,8	785,0	261,4	1082,3	333,1	507,4	313,0
	180	4,57	0,025	358,4	333,7	35,0	785,4	261,4	1088,5	333,1	508,9	313,0
	300	4,56	0,015	360,5	335,3	32,1	785,4	261,4	1087,7	333,1	512,2	313,0
1,0	10,5	3,49	0,303	406,1	377,9	55,0	697,5	255,7	974,8	335,9	388,7	318,7
	31,5	3,29	0,101	434,0	403,8	49,3	686,7	258,5	1021,8	335,9	429,3	324,5
	60	3,24	0,053	443,5	413,0	46,4	683,0	258,5	1033,7	338,8	439,8	324,5
	120	3,21	0,027	450,0	418,8	46,4	680,6	261,4	1040,6	338,8	445,5	324,5
	180	3,21	0,018	452,3	420,9	46,4	678,3	261,4	1042,7	335,9	447,5	324,5
	300	3,19	0,011	454,1	422,7	43,6	679,0	261,4	1044,4	335,9	448,9	324,5
1,5	10,5	2,33	0,202	503,1	468,1	60,8	601,9	249,9	927,2	335,9	324,6	335,9
	31,5	2,19	0,067	517,5	497,2	60,8	576,8	249,9	951,6	341,7	345,8	335,9
	60	2,16	0,354	543,8	505,6	57,9	568,9	255,7	957,0	341,7	350,5	335,9
	120	2,14	0,017	549,8	511,5	55,0	563,6	255,7	959,6	341,7	352,9	335,9
	180	2,135	0,018	551,8	513,5	55,0	562,3	255,7	960,8	341,7	353,9	335,9
	300	2,13	0,007	553,4	514,8	55,0	561,0	255,7	961,1	341,7	355,1	335,9

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А; $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (начало)

C_I , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,1	300	180	0,949	59,8	55,4	14,9	1038	252,8	1075	315,9	603,2	287,2
		120	0,949	58,5	54,5	17,8	1030	250,0	1070	315,9	601,4	284,3
		60	0,948	55,5	51,6	26,4	1026	250,0	1061	315,9	593,5	287,2
		31,5	0,948	54,1	50,3	43,6	1020	250,0	1046	318,7	581,3	287,2
		10,5	0,912	88,0	81,8	95,2	999	250,0	986	315,9	532,8	284,3
	180	300	0,946	62,4	58,1	14,9	1031	252,8	1075	315,9	603,0	287,2
		120	0,948	60,1	55,8	17,8	1028	252,8	1069	315,9	599,1	287,2
		60	0,946	57,2	53,3	26,4	1024	252,8	1061	318,7	591,2	287,2
		31,5	0,946	56,2	52,3	43,6	1018	250,0	1045	318,7	578,5	287,2
		10,5	0,910	89,8	83,7	95,2	997	247,1	986	315,9	549,3	284,3
	120	300	0,944	64,1	59,7	14,9	1036	252,8	1073	318,7	601,2	287,2
		180	0,945	63,1	58,7	17,8	1026	252,8	1070	315,9	599,1	287,2
		60	0,948	59,5	55,4	29,2	1022	250,0	1059	318,7	588,2	287,2
		31,5	0,948	58,8	54,8	46,4	1015	250,0	1043	315,9	576,5	287,2
		10,5	0,914	92,2	85,8	95,2	995	250,0	985	318,7	528,4	284,3

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,1	60	300	0,939	69,9	65,1	23,5	1016	252,8	1069	315,9	593,5	287,2
		180	0,935	69,1	64,3	26,4	1018	252,8	1067	318,7	591,5	287,2
		120	0,941	68,3	63,6	26,4	1017	252,8	1063	318,7	589,0	287,2
		31,5	0,940	67,0	62,4	49,3	1007	252,8	1040	318,7	568,9	287,2
		10,5	0,906	99,5	92,4	89,4	987,4	247,1	981,7	324,5	521,5	284,3
	31,5	300	0,923	81,5	75,9	32,1	1005	252,8	1061	318,7	580,8	288,3
		180	0,929	81,1	75,5	32,1	1003	252,8	1058	318,7	578,1	287,2
		120	0,929	80,6	74,9	35,0	1002	252,8	1054	318,7	575,6	290,1
		60	0,929	80,1	74,4	40,7	998,9	252,8	1046	318,7	568,9	290,1
		10,5	0,893	112,4	104,5	89,4	974,3	249,9	974,8	324,5	509,5	284,3
	10,5	300	0,876	135,6	126,3	49,3	946,4	249,9	1016	318,7	530,6	290,1
		180	0,875	135,9	126,5	46,4	946,2	249,9	1014	318,7	528,2	290,1
		120	0,875	136,1	126,7	49,3	945,1	249,9	1011	318,7	526,7	290,1
		60	0,864	137,1	128,0	55,0	942,5	252,8	942,5	318,7	520,3	290,1
		31,5	0,861	140,2	130,6	60,8	938,0	252,8	938,0	324,5	509,2	284,3

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,3	300	180	0,852	175,0	162,9	17,8	954,4	255,7	1101,2	321,6	584,8	298,7
		120	0,853	173,3	161,3	18,9	955,0	261,4	1098,1	324,5	582,1	298,7
		60	0,857	167,8	156,3	20,6	952,3	255,7	1090,3	324,5	575,5	295,8
		31,5	0,862	159,3	148,4	26,4	949,6	258,5	1074,5	321,6	563,6	295,8
		10,5	0,869	142,6	132,7	55,0	937,9	249,9	1016,4	318,7	517,4	290,1
	180	300	0,850	177,6	165,4	15,9	953,0	255,7	1101,9	324,5	584,8	295,8
		120	0,852	174,3	162,4	26,4	951,7	255,7	1095,6	321,6	580,1	295,8
		60	0,856	168,9	157,1	26,4	950,4	255,7	1088,3	321,6	574,2	295,8
		31,5	0,861	160,6	149,2	26,4	947,8	255,7	1073,2	321,6	561,0	295,8
		10,5	0,876	144,4	134,6	55,0	935,9	255,7	1013,8	321,6	516,1	290,1
	120	300	0,849	178,7	166,3	20,6	924,0	258,5	1099,6	324,5	582,1	295,8
		180	0,850	177,1	165,0	20,6	949,3	255,7	1098,2	324,5	579,5	295,8
		60	0,856	170,1	158,4	23,5	947,8	258,5	1099,6	324,5	570,2	295,8
		31,5	0,860	162,2	150,5	23,5	945,1	255,7	1071,8	324,5	559,7	295,8
		10,5	0,866	146,8	136,0	26,4	933,2	252,8	1013,6	321,6	514,8	290,1

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,3	60	300	0,845	182,5	170,3	20,6	943,8	255,7	1095,2	324,5	574,2	298,7
		180	0,845	180,7	169,0	23,5	942,5	255,7	1092,9	324,5	572,9	298,7
		120	0,847	179,2	166,3	23,5	942,5	255,7	1090,3	324,5	571,6	298,7
		31,5	0,856	167,1	155,8	29,2	938,5	255,7	1081,8	324,5	553,1	295,8
		10,5	0,859	153,4	142,6	55,0	926,6	252,8	1009,8	321,6	508,2	292,9
	31,5	300	0,837	189,5	176,9	26,4	930,6	255,7	1086,3	324,5	563,6	298,7
		180	0,838	188,5	175,6	26,4	930,2	255,7	1083,7	324,5	561,0	298,7
		120	0,839	186,9	174,2	26,4	929,8	255,7	1081,1	324,5	559,7	298,7
		60	0,841	182,5	170,3	29,2	927,9	255,7	1073,2	324,5	553,1	298,7
		10,5	0,850	165,3	154,4	55,0	914,8	252,8	1028,3	321,6	497,6	292,9
	10,5	300	0,801	225,3	209,9	37,8	880,4	255,7	1052,4	324,5	517,4	301,5
		180	0,802	224,8	208,6	37,8	880,4	255,7	1050,7	324,5	514,8	301,5
		120	0,801	223,8	208,3	37,8	880,0	255,7	1048,1	324,5	513,5	301,5
		60	0,802	220,9	205,7	37,8	879,0	255,7	1040,2	324,5	506,9	301,5
		31,5	0,803	227,9	202,5	37,8	860,6	255,7	1027,0	324,5	496,3	301,5

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,5	300	180	0,767	276,1	257,0	26,4	870,3	261,4	1102,2	327,3	551,8	307,3
		120	0,768	274,0	255,0	29,2	870,1	261,4	1099,6	327,3	550,1	307,3
		60	0,772	267,9	249,2	29,2	870,0	261,4	1093,0	327,3	543,8	307,3
		31,5	0,778	258,1	240,1	32,1	869,5	258,5	1079,8	327,3	533,3	304,4
		10,5	0,794	226,6	211,2	43,6	869,5	255,7	1027,0	324,5	493,7	301,5
	180	300	0,765	278,4	259,1	26,4	868,7	261,4	1103,5	327,3	551,8	307,3
		120	0,767	274,6	255,6	26,4	868,6	261,4	1098,2	327,3	547,8	307,3
		60	0,771	268,4	250,1	29,2	868,6	261,4	1091,6	327,3	542,5	307,3
		31,5	0,777	258,8	241,0	32,1	867,9	258,5	1078,4	327,3	532,0	304,4
		10,5	0,793	227,9	212,5	46,4	868,0	255,7	1025,6	324,5	491,0	301,5
	120	300	0,764	265,5	260,0	29,2	866,7	261,4	1100,9	327,3	550,4	307,3
		180	0,765	277,4	258,7	29,2	866,7	261,4	1099,6	327,3	549,1	307,3
		60	0,770	269,4	250,8	29,2	866,5	258,5	1089,0	327,3	540,0	307,3
		31,5	0,776	259,9	241,6	29,4	871,2	258,5	1077,0	327,3	554,4	307,3
		10,5	0,791	229,4	213,8	46,4	871,2	255,7	1024,3	324,5	489,7	301,5

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
0,5	60	300	0,761	281,0	262,7	29,2	860,6	261,4	1096,9	327,3	543,8	307,3
		180	0,762	280,2	260,0	29,2	860,6	261,4	1094,3	327,3	542,5	307,3
		120	0,763	278,2	258,7	29,2	860,6	261,4	1091,6	327,3	539,9	307,3
		31,5	0,774	263,2	244,2	32,1	860,1	258,5	1079,8	327,3	524,0	304,4
		10,5	0,787	254,5	217,8	46,4	860,1	255,7	1020,4	324,5	484,4	301,5
	31,5	300	0,755	291,3	266,6	32,1	850,1	258,5	1086,4	327,3	533,3	307,3
		180	0,756	285,4	265,3	29,2	850,1	258,5	1086,4	327,3	532,0	307,3
		120	0,756	283,6	264,0	32,1	850,1	258,5	1083,7	327,3	529,3	307,3
		60	0,760	278,4	258,7	32,1	850,1	258,5	1077,1	327,3	524,0	307,3
		10,5	0,772	243,1	231,3	49,3	850,1	255,7	1012,4	324,5	473,9	301,5
	10,5	300	0,725	312,2	290,5	37,8	808,2	258,5	1054,7	330,2	492,9	310,1
		180	0,725	310,9	289,5	40,7	808,3	258,5	1054,6	330,2	491,0	310,1
		120	0,726	309,4	288,1	40,7	808,3	258,5	1054,5	330,2	488,4	310,1
		60	0,728	305,5	284,1	40,7	808,3	258,5	1045,4	330,2	483,1	310,1
		31,5	0,730	299,1	278,5	43,6	808,2	255,7	1032,2	324,5	475,2	301,5

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (продолжение)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
1,0	300	180	0,596	452,4	421,1	43,6	679,8	261,4	1042,8	335,9	447,5	324,5
		120	0,597	450,4	419,8	46,3	681,1	261,4	1041,5	335,9	446,2	324,5
		60	0,600	444,7	414,5	46,3	683,8	261,4	1037,3	335,9	443,5	324,5
		31,5	0,606	434,7	405,2	46,3	686,4	261,4	1029,3	335,9	436,9	324,5
		10,5	0,626	397,8	370,9	49,3	708,8	255,7	994,0	335,9	410,5	327,3
	180	300	0,595	454,2	422,4	43,6	678,5	261,4	1042,8	335,9	447,5	327,3
		120	0,596	450,9	419,8	46,3	679,8	261,4	1040,2	335,9	444,8	327,3
		60	0,600	445,7	414,5	46,3	682,4	261,4	1036,2	335,9	442,2	327,3
		31,5	0,577	430,3	405,2	46,3	687,7	261,4	1028,3	335,9	435,6	324,5
		10,5	0,627	398,3	370,9	49,3	708,8	225,7	994,0	335,9	409,2	318,7
	120	300	0,593	454,8	423,7	43,6	677,8	261,4	1041,5	338,8	446,2	324,5
		180	0,594	453,2	422,4	43,6	678,5	261,4	1041,5	338,8	446,8	324,5
		60	0,599	445,5	414,5	43,6	682,4	261,4	1034,9	338,8	448,8	324,5
		31,5	0,605	435,7	405,2	49,4	685,1	261,4	1027,0	335,9	434,3	324,5
		10,5	0,626	399,1	370,9	52,2	707,5	255,7	992,6	335,9	407,9	318,7

Таблица П1.4 – Режим утечки тока через тело человека при несимметрии параметров изоляции сети относительно земли (прикосновение к фазе А, $R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм) (окончание)

C_L , мкФ/фазу	R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	k_{NU}	I_H , мА	U_{FA} , В	φ_A , град.	U_{FB} , В	φ_B , град.	U_{FC} , В	φ_C , град.	U_0 , В	φ_0 , град.
1,0	60	300	0,591	456,3	425,0	43,6	674,5	261,4	1038,8	338,8	442,2	324,5
		180	0,592	446,0	422,4	46,4	675,8	261,4	1037,5	338,8	442,2	327,3
		120	0,594	452,4	421,1	46,4	675,8	261,4	1036,2	338,8	440,9	327,3
		31,5	0,601	437,5	407,9	52,2	728,4	258,5	1023,0	338,8	430,3	324,5
		10,5	0,622	401,4	373,6	52,2	704,9	255,7	988,7	335,9	403,9	318,7
	31,5	300	0,587	458,4	426,4	46,4	669,2	261,4	1032,2	338,8	435,6	324,5
		180	0,588	457,1	425,0	46,4	670,6	261,4	1030,9	338,8	434,3	324,5
		120	0,588	454,8	423,7	46,4	670,8	261,4	1029,6	338,8	433,5	324,5
		60	0,592	450,1	418,4	49,3	670,7	261,4	1024,3	338,8	430,3	324,5
		10,5	0,616	406,0	377,5	52,2	669,2	255,7	983,4	335,9	396,0	318,7
	10,5	300	0,563	471,8	439,6	49,3	646,8	261,4	1007,2	338,8	409,2	327,3
		180	0,564	471,8	438,2	49,3	648,1	261,4	1005,8	338,8	407,9	327,3
		120	0,565	469,2	436,9	49,3	649,4	261,4	1004,5	338,8	406,6	327,3
		60	0,569	464,0	431,6	49,3	650,8	261,4	1000,6	338,8	402,6	327,3
		31,5	0,512	458,9	423,7	49,3	656,1	261,4	993,2	335,9	396,0	324,5

Таблица П1.5 – Коэффициенты несимметрии фазных напряжений в режиме утечки тока через человека ($R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм)

R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	$C_A = C_B = C_C$, мкФ				
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
300	300	0,950	0,850	0,766	0,692	0,595
	180	0,949	0,852	0,767	0,689	0,596
	120	0,949	0,853	0,768	0,689	0,597
	60	0,948	0,857	0,772	0,667	0,600
	31,5	0,948	0,862	0,778	0,703	0,606
	10,5	0,912	0,869	0,794	0,716	0,626
180	300	0,946	0,850	0,765	0,691	0,595
	180	0,947	0,851	0,766	0,693	0,596
	120	0,948	0,852	0,767	0,693	0,596
	60	0,946	0,856	0,771	0,696	0,600
	31,5	0,946	0,861	0,777	0,696	0,577
	10,5	0,910	0,876	0,793	0,722	0,627
120	300	0,944	0,849	0,764	0,690	0,593
	180	0,945	0,850	0,765	0,691	0,594
	120	0,946	0,854	0,767	0,694	0,598
	60	0,948	0,856	0,770	0,695	0,599
	31,5	0,948	0,860	0,776	0,702	0,605
	10,5	0,914	0,866	0,791	0,720	0,626
60	300	0,939	0,845	0,761	0,687	0,591
	180	0,935	0,845	0,762	0,688	0,592
	120	0,941	0,847	0,763	0,689	0,594
	60	0,941	0,841	0,762	0,695	0,600
	31,5	0,940	0,856	0,774	0,698	0,601
	10,5	0,906	0,859	0,787	0,715	0,622
31,5	300	0,923	0,837	0,755	0,681	0,587
	180	0,929	0,838	0,756	0,682	0,588
	120	0,929	0,839	0,756	0,683	0,588
	60	0,929	0,841	0,760	0,685	0,592
	31,5	0,927	0,852	0,769	0,699	0,605
	10,5	0,893	0,850	0,772	0,708	0,616
10,5	300	0,876	0,801	0,725	0,655	0,563
	180	0,875	0,802	0,725	0,656	0,564
	120	0,875	0,801	0,726	0,653	0,565
	60	0,864	0,802	0,728	0,655	0,569
	31,5	0,861	0,803	0,730	0,663	0,512
	10,5	0,850	0,810	0,753	0,695	0,612

Таблица П1.6 – Ток I_H через человека при несимметрии параметров изоляции фаз сети с изолированной нейтралью $U_F = 660$ В ($R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм)

R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	$C_A = C_B = C_C$, мкФ				
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
300	300	60,6	177,4	277,7	360,5	454,1
	180	59,8	175,0	276,1	358,6	452,4
	120	58,5	173,3	274,0	356,5	450,4
	60	55,5	167,8	267,9	350,6	444,7
	31,5	54,1	159,3	258,1	340,3	434,7
	10,5	88,0	142,6	226,6	304,2	397,8
180	300	62,4	177,6	278,4	360,7	454,2
	180	61,1	175,8	276,2	358,4	452,3
	120	60,1	174,3	274,6	357,1	450,9
	60	57,2	168,9	268,4	351,1	445,7
	31,5	56,2	160,6	258,8	341,1	430,3
	10,5	89,8	144,4	227,9	305,0	398,3
120	300	64,1	178,7	265,5	360,9	454,8
	180	63,1	177,1	277,4	359,6	453,2
	120	61,6	174,6	274,3	354,6	450,0
	60	59,5	170,1	269,4	351,9	445,5
	31,5	58,8	162,2	259,9	341,8	435,7
	10,5	92,2	146,8	229,4	306,3	399,1
60	300	69,9	182,5	281,0	363,5	456,3
	180	69,1	180,7	280,2	360,9	446,0
	120	68,3	179,2	278,2	359,9	452,4
	60	65,7	172,2	269,7	351,0	443,5
	31,5	67,0	167,1	263,2	344,2	437,5
	10,5	99,5	153,4	254,5	288,7	401,4
31,5	300	81,5	189,5	291,3	367,4	458,4
	180	81,1	188,5	285,4	365,8	457,1
	120	80,6	186,9	283,6	364,0	454,8
	60	80,1	182,5	278,4	358,3	450,1
	31,5	79,5	171,7	263,5	341,9	434,0
	10,5	112,4	165,3	243,1	289,5	406,0
10,5	300	135,6	225,3	312,2	385,9	471,8
	180	135,9	224,8	310,9	385,9	471,8
	120	136,1	223,8	309,4	383,1	469,2
	60	137,1	220,9	305,5	378,5	464,0
	31,5	140,2	227,9	299,1	370,5	458,9
	10,5	153,5	199,3	262,5	324,9	406,1

Таблица П1.7 – Количество электричества $Q_{н.сз}$ за время срабатывания
УЗО при несимметрии параметров изоляции ($R_{FA} = 300$ кОм, $R_H = 1$ кОм)

R_{FB} , кОм	R_{FC} , кОм	$C_A = C_B = C_C$, мкФ				
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
300	300	8,57	25,1	39,3	50,9	64,2
	180	8,46	24,8	39,0	50,7	63,0
	120	8,27	24,5	38,8	50,4	63,6
	60	7,85	23,7	37,9	49,6	62,9
	31,5	7,65	22,5	36,5	48,1	61,5
	10,5	12,4	20,2	32,1	43,0	56,3
180	300	8,82	25,1	39,4	51,0	64,2
	180	8,64	24,9	39,1	50,6	63,0
	120	8,5	24,6	38,8	50,5	63,6
	60	8,08	23,9	38,0	49,7	63,0
	31,5	7,95	22,6	36,6	48,2	60,8
	10,5	12,6	20,4	32,2	43,1	56,3
120	300	9,07	25,7	37,5	50,9	64,3
	180	8,92	25,1	39,2	50,8	64,1
	120	8,7	24,7	38,8	50,1	63,6
	60	8,4	24,1	38,1	49,77	63,0
	31,5	8,3	22,9	36,7	48,3	61,6
	10,5	13,1	20,8	32,4	43,3	56,4
60	300	9,89	25,8	39,7	51,4	64,5
	180	9,77	25,6	39,6	50,9	63,1
	120	9,7	25,3	39,3	50,9	64,0
	60	9,29	24,4	38,1	49,6	62,7
	31,5	9,48	23,6	37,2	48,7	61,9
	10,5	14,1	21,6	36,0	40,8	56,8
31,5	300	11,5	26,8	41,2	52,0	64,8
	180	11,46	26,7	40,4	51,7	64,6
	120	11,4	26,4	40,1	51,5	64,3
	60	11,3	25,8	39,4	50,6	63,7
	31,5	11,2	24,3	37,2	48,4	61,4
	10,5	15,9	23,3	34,4	40,9	57,4
10,5	300	19,2	31,8	44,2	54,6	66,7
	180	19,2	31,8	43,8	54,6	66,7
	120	19,2	31,7	43,7	54,2	66,4
	60	19,4	31,2	43,2	53,5	65,6
	31,5	19,8	32,2	42,3	52,3	64,9
	10,5	21,7	28,2	37,1	45,9	57,4

Таблица П1.8 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 160 кВт (начало)

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$t_{IH=6 мА}$, с	$Q_{H(t=1с)}$, мА·с
0,1	10,5	34,88	3,033	153,4	58,3	20,1	7,3	30,7	13,3	4,9	1,01	48,9
	31,5	32,86	1,011	79,4	24,3	8,3	3,9	15,0	5,5	2,2	0,81	22,7
	60	32,38	0,531	65,7	15,6	4,8	3,2	11,8	3,5	1,4	0,61	16,7
	120	32,11	0,265	61,6	11,7	4,8	3,3	10,6	2,8	1,4	0,58	14,8
	180	32,03	0,177	61,1	10,9	4,8	2,7	10,4	2,7	1,4	0,60	14,5
	300	31,95	0,106	61,1	10,6	2,2	2,7	10,3	2,2	0,9	0,48	13,4
0,3	10,5	11,63	1,011	199,3	61,9	20,7	9,8	37,9	14,0	5,5	1,13	57,4
	31,5	10,95	0,337	171,7	35,6	9,8	7,5	30,1	7,7	3,1	1,13	40,9
	60	10,79	0,177	172,2	31,7	7,5	7,9	29,6	6,7	2,8	1,14	39,1
	120	10,71	0,085	174,7	30,9	6,7	8,1	30,7	6,4	2,7	1,19	39,8
	180	10,68	0,059	175,8	30,9	6,5	8,1	30,0	6,3	2,6	1,16	38,9
	300	10,65	0,035	176,6	31,2	6,2	8,1	30,1	5,4	2,6	1,16	38,1
0,5	10,5	6,98	0,607	262,4	68,8	21,9	11,6	48,0	15,4	6,0	1,30	69,4
	31,5	6,57	0,292	263,5	51,0	13,2	12,8	45,6	10,9	4,7	1,32	61,2
	60	6,48	0,106	269,7	50,0	11,1	11,8	46,4	10,5	4,1	1,33	61,0
	120	6,42	0,053	274,3	50,5	10,4	11,9	47,1	10,4	4,0	1,33	61,5
	180	6,41	0,035	276,1	50,8	10,4	12,1	47,4	10,4	4,0	1,34	61,8
	300	6,39	0,021	277,7	51,3	10,4	12,2	47,7	10,5	4,0	1,34	62,2

Таблица П1.8 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 160 кВт (окончание)

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$t_{IH=6\text{ мА}}$, с	$Q_{H(t=1с)}$, мА·с
0,7	10,5	4,98	0,433	324,9	77,9	23,2	14,7	58,4	17,2	6,8	1,38	82,4
	31,5	4,69	0,144	341,8	67,5	15,7	15,0	59,4	14,1	5,5	1,39	79,0
	60	4,62	0,076	351,0	68,3	14,7	15,5	60,8	14,1	5,4	1,40	80,3
	120	4,59	0,038	356,5	69,6	14,7	15,7	61,8	14,3	5,5	1,41	81,6
	180	4,57	0,025	358,3	70,1	14,7	15,8	62,1	14,4	5,5	1,41	82,0
	300	4,56	0,015	360,4	70,6	15,0	15,9	62,5	14,6	5,6	1,42	82,6
1,0	10,5	3,49	0,303	406,0	93,6	25,8	17,9	72,4	20,3	7,9	1,43	100,6
	31,5	3,29	0,101	434,0	91,8	20,6	19,1	76,6	19,1	7,2	1,44	102,9
	60	3,24	0,053	443,4	94,1	20,1	19,3	77,9	19,4	7,1	1,44	104,4
	120	3,21	0,027	450,0	95,9	20,2	19,9	79,2	19,7	7,2	1,45	106,1
	180	3,21	0,018	452,2	96,7	20,3	19,9	79,6	19,9	7,2	1,45	106,7
	300	3,19	0,011	454,0	97,2	20,4	20,1	79,9	20,0	7,3	1,45	107,2
1,5	10,5	2,33	0,202	502,7	120,7	31,2	22,2	90,4	25,8	9,6	1,47	125,8
	31,5	2,19	0,067	533,7	127,1	28,6	23,2	95,8	26,5	9,3	1,47	131,6
	60	2,16	0,354	544,0	130,7	29,1	23,5	97,8	27,2	9,5	1,48	134,5
	120	2,14	0,017	549,1	133,0	29,4	23,7	98,9	27,6	9,6	1,48	136,1
	180	2,135	0,018	556,9	133,8	29,5	24,0	100,2	27,8	9,6	1,48	137,6
	300	2,13	0,007	559,0	134,6	29,6	24,0	100,6	27,9	9,7	1,48	138,2

Таблица П1.9 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 110 кВт

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$Q_{H.t=1 с}$, мА·с
0,1	10,5	34,88	3,033	156,1	81,7	40,5	18,1	25,2	12,9	6,2	44,3
	300	31,95	0,106	64,2	38,0	32,3	6,8	10,8	7,4	4,1	22,3
0,3	10,5	11,63	1,011	202,9	82,2	41,0	23,9	30,2	13,0	6,9	50,1
	300	10,65	0,035	179,7	40,5	21,3	19,7	23,3	6,5	4,3	34,1
0,5	10,5	6,98	0,607	267,3	99,3	42,1	30,2	38,8	15,0	7,6	61,4
	300	6,39	0,021	282,5	96,8	42,6	31,5	40,1	14,7	7,8	62,6
0,7	10,5	4,98	0,433	331,0	114,0	43,4	37,9	47,1	16,6	8,6	72,3
	300	4,56	0,015	366,0	106,2	56,0	41,0	49,9	17,2	10,3	77,4
1,0	10,5	3,49	0,303	411,7	138,5	47,5	46,6	58,2	19,7	10,0	97,6
	300	3,19	0,011	465,8	145,4	66,1	51,6	64,6	22,4	12,9	99,9
1,5	10,5	2,33	0,202	511,5	179,2	78,2	58,3	73,0	27,2	14,4	114,6
	300	2,13	0,007	573,6	199,3	88,5	64,5	81,7	30,4	16,2	128,3

Таблица П1.10 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 75 кВт

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$Q_{H.t=1с}$, мА·с
0,1	10,5	34,88	3,033	155,5	98,3	60,1	34,8	26,8	16,8	10,1	53,7
	300	31,95	0,106	60,3	27,1	7,6	2,2	9,2	3,7	1,1	14,0
0,3	10,5	11,63	1,011	202,8	110,0	62,4	35,0	33,1	18,2	10,3	61,6
	300	10,65	0,035	179,2	75,5	24,0	4,5	26,9	10,5	3,0	40,4
0,5	10,5	6,98	0,607	267,1	133,0	66,5	35,5	42,3	21,1	10,8	74,2
	300	6,39	0,021	282,0	122,7	33,0	6,9	42,8	16,5	4,2	63,5
0,7	10,5	4,98	0,433	330,0	160,0	72,4	36,1	51,8	24,6	11,5	87,9
	300	4,56	0,015	367,4	165,4	45,9	9,4	56,3	22,3	5,8	84,4
1,0	10,5	3,49	0,303	415,0	199,8	83,3	37,1	65,0	29,9	12,7	107,6
	300	3,19	0,011	467,9	219,7	64,5	13,5	72,7	30,1	8,3	111,1
1,5	10,5	2,33	0,202	523,3	257,1	90,5	39,7	82,5	36,7	13,7	132,9
	300	2,13	0,007	585,2	282,3	109,8	19,3	91,7	41,5	13,7	146,9

Таблица П1.11 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 45 кВт

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$Q_{H.t=1 с}$, мА·с
0,1	10,5	34,88	3,033	158,8	118,6	88,9	62,9	29,3	21,9	16,1	67,3
	300	31,95	0,106	63,4	33,5	15,5	5,8	10,3	5,2	2,3	25,9
0,3	10,5	11,63	1,011	207,3	139,2	94,4	53,6	36,6	24,7	15,7	77,0
	300	10,65	0,035	183,3	100,5	45,1	15,5	29,9	15,3	6,4	44,6
0,5	10,5	6,98	0,607	273,2	179,2	104,6	62,2	47,8	29,9	17,6	95,3
	300	6,39	0,021	289,0	164,7	74,3	14,7	48,0	25,3	9,4	82,7
0,7	10,5	4,98	0,433	339,0	207,5	123,5	46,5	57,8	35,0	18,0	110,8
	300	4,56	0,015	369,2	218,9	126,0	56,5	62,2	36,4	19,3	117,9
1,0	10,5	3,49	0,303	436,7	252,8	141,8	78,3	72,8	41,7	23,3	137,8
	300	3,19	0,011	511,7	301,6	141,7	51,3	85,9	46,8	20,4	153,0
1,5	10,5	2,33	0,202	542,1	332,6	191,5	88,1	92,5	55,4	29,6	177,5
	300	2,13	0,007	553,0	366,8	198,5	100,3	97,3	59,8	31,6	188,7

Таблица П1.12 – Режим утечки тока через тело человека при генерировании обратной ЭДС электродвигателем мощностью 30 кВт

C_L , мкФ фазу	R_L , кОм фазу	T_H , рад/с	T_L , рад/с	$I_{t=0,01с}$, мА	$I_{t=0,3с}$, мА	$I_{t=0,64с}$, мА	$I_{t=1,0с}$, мА	Q_{H1} , мА·с	Q_{H2} , мА·с	Q_{H3} , мА·с	$Q_{H.t=1с}$, мА·с
0,1	10,5	34,88	3,033	155,7	128,4	106,9	88,2	30,1	24,9	20,7	75,7
	300	31,95	0,106	62,2	51,7	39,2	35,2	12,1	9,7	7,9	29,7
0,3	10,5	11,63	1,011	203,5	168,9	139,9	114,7	39,3	32,7	26,9	98,9
	300	10,65	0,035	180,0	150,2	123,7	102,8	34,9	28,9	23,7	87,5
0,5	10,5	6,98	0,607	268,4	224,1	184,7	152,2	52,8	43,2	35,6	131,6
	300	6,39	0,021	291,3	235,8	194,8	156,5	55,7	45,5	37,1	138,3
0,7	10,5	4,98	0,433	333,5	277,4	228,8	188,2	64,6	48,2	44,1	156,9
	300	4,56	0,015	384,0	301,6	247,0	206,2	72,4	58,1	47,9	178,4
1,0	10,5	3,49	0,303	425,4	345,2	283,6	234,9	81,5	66,5	54,8	202,8
	300	3,19	0,011	479,5	381,5	314,7	250,0	91,1	73,6	59,6	224,3
1,5	10,5	2,33	0,202	506,6	417,6	348,8	275,8	97,7	81,1	66,1	244,9
	300	2,13	0,007	546,0	456,0	373,8	304,2	106,0	87,7	71,7	265,4

Таблица П1.13 – Расчетные значения эквивалентного сопротивления и электромагнитной постоянной колебательного контура фазной изоляции с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции ($C_I = 0,1$ мкФ/фазу, $C_A = 0,1$ мкФ/фазу)

R_A , кОм	$\ln(R_A)$	$R_I = 31,5$ кОм		$R_I = 60$ кОм		$R_I = 120$ кОм		$R_I = 240$ кОм	
		R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад/с	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад/с	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад/с	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад/с
100000	11,51	31,5	1,011	60,0	0,5311	119,9	0,266	239,4	0,133
10000	9,21	31,4	1,014	59,6	0,534	118,6	0,269	234,4	0,136
5000	8,51	31,3	1,017	59,3	0,537	117,2	0,271	229,0	0,139
2500	7,82	31,1	1,020	58,6	0,543	114,5	0,278	219,0	0,145
1000	6,91	30,5	1,042	56,6	0,562	107,2	0,297	193,0	0,164
750	6,62	30,2	1,050	55,6	0,572	103,5	0,307	181,9	0,174
500	6,21	29,6	1,070	53,6	0,592	96,9	0,328	162,4	0,195
250	5,52	28,0	1,119	48,5	0,646	81,5	0,384	123,4	0,254
125	4,83	25,5	1,178	41,4	0,725	63,1	0,476	85,6	0,305
60,5	4,1	22,2	1,169	33,8	0,775	47,0	0,557	58,5	0,447
30,1	3,41	21,1	0,988	31,1	0,671	41,7	0,500	50,4	0,413

Таблица П1.14 – Расчетные значения эквивалентного сопротивления и электромагнитной постоянной колебательного контура фазной изоляции с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции ($C_I = 0,1$ мкФ/фазу, $C_A = 0,01$ мкФ/фазу)

R_A , кОм	$\ln(R_A)$	$R_I = 31,5$ кОм		$R_I = 60$ кОм		$R_I = 120$ кОм		$R_I = 240$ кОм	
		R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	T_{IF} , рад
100000	11,51	31,5	1,011	60,0	0,531	119,9	0,266	239,4	0,133
10000	9,21	31,4	1,014	59,6	0,534	118,6	0,269	234,4	0,136
5000	8,51	31,3	1,016	59,3	0,537	117,2	0,272	229,1	0,139
2500	7,82	31,1	1,022	58,6	0,543	114,6	0,278	219,3	0,145
1000	6,91	30,7	1,030	56,9	0,555	108,2	0,292	197,1	0,160
750	6,62	30,4	1,031	56,2	0,558	105,7	0,297	188,8	0,166
500	6,21	30,2	1,027	55,3	0,556	102,5	0,302	178,9	0,173
250	5,52	30,1	0,998	55,0	0,546	101,4	0,298	175,7	0,171
125	4,83	29,3	0,961	56,4	0,519	106,3	0,278	191,0	0,153
60,5	4,1	29,1	0,938	58,0	0,500	112,2	0,258	210,0	0,138
30,1	3,41	29,0	0,928	59,4	0,488	115,0	0,250	224,0	0,129

Таблица П1.15 – Расчетные значения эквивалентного сопротивления и электромагнитной постоянной колебательного контура фазной изоляции с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции ($R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,1$ мкФ/фазу)

R_A , кОм	$\ln(R_A)$	$C_A = 0,01$ мкФ/фазу			$C_A = 0,1$ мкФ/фазу			$C_A = 0,15$ мкФ/фазу			$C_A = 0,3$ мкФ/фазу			$C_A = 0,5$ мкФ/фазу		
		R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад
100000	11,51	60,0	31,85	0,531	60,0	31,85	0,531	60,0	31,85	0,531	60,0	31,85	0,531	60,0	31,85	0,531
10000	9,21	59,6	31,84	0,534	59,6	31,84	0,534	59,6	31,84	0,534	59,6	31,84	0,534	59,6	31,84	0,534
5000	8,51	59,3	31,8	0,536	59,3	31,85	0,537	59,3	31,85	0,537	59,3	31,85	0,537	59,3	31,85	0,537
2500	7,82	58,6	31,8	0,542	58,6	31,84	0,543	58,6	31,84	0,543	58,6	31,84	0,543	58,6	31,84	0,543
1000	6,91	56,6	31,56	0,554	56,6	31,82	0,562	56,6	31,82	0,562	56,6	31,82	0,562	56,6	31,82	0,562
750	6,62	56,2	31,37	0,558	55,6	31,79	0,572	55,6	31,81	0,573	55,6	31,81	0,573	55,6	31,81	0,573
500	6,21	55,3	30,95	0,560	53,6	31,72	0,591	53,6	31,76	0,593	53,6	31,8	0,594	53,6	31,8	0,594
250	5,52	55,0	30,0	0,546	48,5	31,34	0,646	48,5	31,51	0,650	48,4	31,68	0,654	48,3	31,73	0,656
125	4,83	56,4	29,31	0,519	41,3	30,02	0,726	43,1	30,94	0,718	40,6	31,18	0,767	40,6	31,96	0,774
60,5	4,1	58,0	29,04	0,501	33,8	26,17	0,775	31,9	27,35	0,86	30,6	29,23	0,956	30,3	30,01	0,999
30,1	3,41	59,0	28,98	0,491	30,90	20,84	0,674	25,7	21,25	0,83	21,6	23,90	1,105	20,8	25,77	1,240

Таблица П1.16 – Расчетные значения эквивалентного сопротивления и электромагнитной постоянной колебательного контура фазной изоляции с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции ($R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,3$ мкФ/фазу)

R_A , кОм	$\ln(R_A)$	$C_A = 0,01$ мкФ/фазу			$C_A = 0,1$ мкФ/фазу			$C_A = 0,15$ мкФ/фазу			$C_A = 0,3$ мкФ/фазу			$C_A = 0,5$ мкФ/фазу		
		R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад
100000	11,51	60,0	10,61	0,177	60,0	10,61	0,177	60,0	10,61	0,177	60,0	10,61	0,177	60,0	10,61	0,177
10000	9,21	59,6	10,62	0,178	59,6	10,62	0,178	59,6	10,62	0,178	59,6	10,62	0,178	59,6	10,62	0,178
5000	8,51	59,3	10,62	0,179	59,3	10,62	0,179	59,3	10,62	0,179	59,3	10,62	0,179	59,3	10,62	0,179
2500	7,82	58,6	10,62	0,181	58,6	10,62	0,181	58,6	10,62	0,181	58,6	10,62	0,181	58,6	10,62	0,181
1000	6,91	56,9	10,58	0,186	56,6	10,61	0,188	56,6	10,61	0,188	56,6	10,61	0,188	56,6	10,61	0,188
750	6,62	56,2	10,56	0,188	55,6	10,61	0,191	55,6	10,61	0,191	55,6	10,61	0,191	55,6	10,61	0,191
500	6,21	55,3	10,5	0,19	53,6	10,61	0,198	53,6	10,61	0,198	53,6	10,61	0,198	53,6	10,61	0,198
250	5,52	55,0	10,4	0,189	48,5	10,6	0,219	48,5	10,6	0,219	48,5	10,6	0,219	48,5	10,6	0,219
125	4,83	56,5	10,31	0,183	41,4	10,4	0,252	40,9	10,5	0,256	40,6	10,56	0,259	40,6	10,56	0,259
60,5	4,1	58,0	10,28	0,177	33,8	9,90	0,293	31,7	10,1	0,315	30,6	10,31	0,337	30,3	10,4	0,343
30,1	3,41	59,0	10,27	0,174	30,9	9,03	0,292	25,7	9,1	0,354	21,6	9,56	0,442	20,8	9,84	0,473

Таблица П1.18 – Расчетные значения эквивалентного сопротивления и электромагнитной постоянной колебательного контура фазной изоляции с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции ($R_I = 60$ кОм/фазу, $C_I = 0,5$ мкФ/фазу)

R_A , кОм	$\ln(R_A)$	$C_A = 0,01$ мкФ/фазу			$C_A = 0,1$ мкФ/фазу			$C_A = 0,15$ мкФ/фазу			$C_A = 0,3$ мкФ/фазу			$C_A = 0,5$ мкФ/фазу		
		R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад	R_{IF} , кОм	X_{IF} , кОм	T_{IF} , рад
100000	11,51	60,0	6,37	0,101	60,0	6,37	0,101	60,0	6,37	0,101	60,0	6,37	0,101	60,0	6,37	0,101
10000	9,21	59,6	6,37	0,107	59,6	6,37	0,107	59,6	6,37	0,107	59,6	6,37	0,107	59,6	6,37	0,107
5000	8,51	59,3	6,37	0,107	59,3	6,37	0,107	59,3	6,37	0,107	59,3	6,37	0,107	59,3	6,37	0,107
2500	7,82	58,6	6,36	0,109	58,6	6,36	0,109	58,6	6,36	0,109	58,6	6,36	0,109	58,6	6,36	0,109
1000	6,91	56,6	6,36	0,112	56,6	6,36	0,112	56,6	6,36	0,112	56,6	6,36	0,112	56,6	6,36	0,112
750	6,62	56,2	6,35	0,113	55,6	6,37	0,115	55,6	6,37	0,115	55,6	6,37	0,115	55,6	6,37	0,115
500	6,21	55,3	6,33	0,114	53,6	6,36	0,119	53,6	6,36	0,119	53,6	6,36	0,119	53,6	6,36	0,119
250	5,52	55,0	6,30	0,115	48,5	6,36	0,131	48,5	6,36	0,131	48,5	6,36	0,131	48,5	6,36	0,131
125	4,83	56,4	6,26	0,111	41,35	6,29	0,152	40,9	6,32	0,154	40,6	6,35	0,157	40,6	6,35	0,157
60,5	4,1	58,0	6,25	0,107	33,8	6,11	0,181	31,9	6,17	0,194	30,6	6,26	0,205	30,3	6,29	0,207
30,1	3,41	59,9	6,24	0,105	30,9	5,76	0,186	25,7	5,79	0,225	21,60	5,97	0,276	20,8	6,08	0,293

Таблица П1.19 – Параметры режима утечки тока в короткой комбинированной сети (1) без компенсатора емкостного тока утечки

Параметры изоляции		Токи утечки					Напряжения фаз сети и нейтрали				К-т несимметрии
C_I , мкФ	R_I , кОм	i_{max} , мА	i_A , мА	i_B , мА	i_C , мА	i_0 , мА	u_A , В	u_B , В	u_C , В	u_0 , В	k_{NU}
0,05	30	54	52	25	24,4	33,9	53	659	674	154	0,92
	60	38	36	16	15,9	35,4	35,4	676	684	161	0,95
	120	32	28,4	12,9	12,7	36	28	690	690	164	0,96
	180	30	26,5	12,2	12,1	36,2	25,9	693	687	166	0,96
	300	28	24,4	11,8	11,8	36,4	24,4	695	691	167	0,97
0,15	30	61,8	57,5	41,8	39	35,5	55,6	668	721	162	0,84
	60	50	42,3	37	34,4	37	41,6	689	734	170	0,94
	120	45	35,5	35,7	34	37,8	35,1	702	740	173	0,95
	180	43	32,3-	35,55	34	36,6	31,8	700	732	174,5	0,96
	300	42	30,7	35,5	33	36,6	30,6	689	724	175	0,96
0,25	30	86,7	83,6	65,8	57,7	36,9	81	674	768	169	0,89
	60	78,2	74,6	63,3	56,5	38,6	73,2	698	784	177	0,9
	120	75,3	71,7	62,8	56,5	39,6	70,9	710	793	182	0,91
	180	74,6	70,9	63	56,7	39,9	70,3	715	796	183	0,91
	300	74	70,5	63	56,9	40,1	70	717	798	185	0,91
0,5	30	182	185	142	107	39,8	176	667	884	183	0,8
	60	186	186	143,5	109,2	41,8	180	691	907	192	0,8
	120	188	188	145	110,7	43	184	705	920	197	0,8
	180	188	189	145,5	111,5	43,4	185	709	925	199	0,8
	300	189	188	146	112	43,6	186	713	930	201	0,8

Таблица П1.20 – Результаты измерений коэффициентов n -ых гармонических составляющих тока и суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока в цепях утечки через изоляцию

Параметры изоляции		Гармоники – $K_{I(n)} (\%)$, $K_I (\%)$ симметричный режим утечки					Гармоники – $K_{I(n)} (\%)$, $K_I (\%)$ однофазный режим утечки				
C_I , мкФ	R_I , кОм	3	5	7	9	$K_I (\%)$	3	5	7	9	$K_I (\%)$
0,05	30	14,7	4,5	4,3	16	23,1	12	5	3	2,5	13,62
	60	25	7	7	32	43,63	19	9	5,2	4,2	21,97
	120	33	9	9	45	64,2	25	13	8	5,5	30,28
	180	36	9,5	9,5	49	76,4	28	15	9	6,4	34,2
	300	37	10	10	51	95	31	17	10	7	37,9
0,15	30	9,2	21	8,8	5,6	25,97	15	6	1,6	1,75	16,38
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	11	27	11	7	34,6	32	10,5	3	2,9	34,2
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	11	27,2	15	7	35,6	38,1	11,9	3,05	3,15	40,4
0,25	30	6,5	25,9	3,2	2,9	26,6	7,8	3,4	1,05	1,1	8,7
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	7	29,5	3,5	3,2	30,9	10,8	4	1,2	1,3	11,72
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	7	29,8	3,5	3,2	31,2	11,4	4	1,2	1,3	12,29
0,5	30	8,8	4,4	1,2	1,25	10,1	0,85	1,35	0,44	0,48	1,84
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	9,6	4,5	1,2	1,3	10,78	0,8	1,3	0,44	0,48	1,82
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	9,5	4,5	1,25	1,3	10,1	0,8	1,3	0,43	0,47	1,81

Таблица П1.21 – Результаты измерений коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения и суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в цепях утечки через изоляцию

Параметры изоляции		Гармоники – $K_{U(n)} (\%)$, $K_U (\%)$ симметричный режим утечки					Гармоники – $K_{U(n)} (\%)$, $K_U (\%)$ однофазный режим утечки				
C_I , мкФ	R_I , кОм	3	5	7	9	$K_U (\%)$	3	5	7	9	$K_U (\%)$
0,05	30	9,5	2	1,5	4	10,6	12	5	3	2,5	13,6
	60	11,5	2	1,5	5,2	12,9	19	9	5	4	21,9
	120	12,3	2	1,5	5,3	14,4	25	13	7	5,5	30,22
	180	12,5	2	1,5	5,75	14,75	28,5	15	8,8	6,2	34,1
	300	12,6	2	1,5	5,8	15,8	31	17	10	7	37,8
0,15	30	3,75	5,1	1,6	0,8	6,63	14,9	5,8	1,6	1,6	16,2
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	3,7	5,4	1,6	0,75	7,21	32	10	2,2	2,2	33,9
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	3,8	5,5	1,6	0,75	7,29	38	11,8	3	3	39,7
0,25	30	2,4	5,5	0,5	0,35	6,03	7,8	3,1	0,9	0,9	8,42
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	2,4	5,9	0,5	0,35	6,47	10,6	3,7	1,1	1,1	11,36
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	2,4	6	0,5	0,35	6,5	11,2	3,8	1,1	1,1	11,9
0,5	30	3	1,9	0,18	0,14	3,17	0,8	1,5	0,3	0,28	1,53
	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	120	3,2	0,9	0,18	0,14	3,34	0,75	1,05	0,3	0,28	1,51
	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	300	3,2	0,9	0,18	0,14	3,34	0,72	1,2	0,3	0,275	1,5

Таблица П1.22 – Параметры УЗО в короткой комбинированной сети (1) без компенсатора емкостного тока утечки

C_I , мкФ	R_I , кОм	I_{FA} , мА	I_{FB} , мА	I_{FC} , мА	I_0 , мА	U_{FA} , В	U_{FB} , В	U_{FC} , В	U_0 , В	K_{NU} (%)
0,05	30	8,8	22,5	26,2	33,9	187,5	616	522	154	0,7
	60	8,65	22,6	27,1	35,4	184,5	630	523	161	0,7
	120	8,6	22,65	27,4	36	183,9	636	525	164	0,71
	180	8,6	22,7	27,5	36,2	183,3	640	524,5	165,7	0,71
	300	8,6	22,7	27,6	36,2	183,3	642	525	166,5	0,715
0,15	30	7,85	23,6	26,6	35,5	159	617	547	162	0,74
	60	7,6	23,8	27,2	37	157,1	632	551	169,4	0,75
	120	7,5	23,8	27,5	37,8	154,5	640	553	173	0,76
	180	7,12	23,9	27,7	38,1	153,8	643	554	174,5	0,76
	300	7,45	23,9	27,7	38,3	153	645	554	175	0,76
0,25	30	7	24,7	26,5	36,9	150,7	675	767	169	0,78
	60	6,6	25	27,2	38,6	130,7	631	578	177	0,79
	120	6,4	25,2	27,5	39,6	126	639	583	181,6	0,8
	180	6,3	25,2	27,6	39,9	124	642	584	183	0,81
	300	6,3	25,2	27,7	40,1	123	645	585	185	0,81
0,5	30	6,2	27,4	25,5	39,8	118	593	634	183	0,81
	60	5,55	27,6	26,2	41,8	101	608	647	192	0,84
	120	5,2	28,1	26,5	43	92	617	654	197	0,86
	180	5,1	28,2	26,7	43,4	88,7	620	656	199	0,87
	300	5,05	28,3	26,8	43,6	86	622,5	657	201	0,87

Таблица П1.23 – Действующие значения токов в цепях фильтра УЗО и суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока

C_L , мкФ/фазу	R_L , кОм/фазу	Симметричный режим утечки			Режим однофазной утечки							
		I_F , мА	K_I , %	I_N , мА	I_{FA} , мА	K_I , %	I_{FB} , мА	K_I , %	I_{FC} , мА	K_I , %	I_N , мА	K_I , %
0,05	80	17,5	5,27	3,3	10,5	7,79	25,2	3,1	20,7	3,78	28,3	8,85
	180	17,4	5,03	3	10,4	7,28	25,3	3,07	20,8	3,78	28,7	8,6
	300	17,4	5,07	2,9	10,5	7,82	25,5	3,06	20,9	3,77	28,8	8,59
0,1	180	17,4	4,98	2,75	10	8	25,5	3	21,5	3,6	29,35	8,4
0,15	180	17,4	4,31	2,68	9,5	8,44	25	3,14	21,7	3,69	30	8,4
0,5	180	17,4	4,52	2,58	7,2	14,1	24,4	3,87	25,3	3,7	34	8,7

Преобладает третья гармоника

Таблица П1.24 – Действующие значения напряжения в цепях фильтра УЗО и суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения

C_L , мкФ/фазу	R_L , кОм/фазу	Симметричный режим утечки			Режим однофазной утечки							
		U_F , В	K_U , %	U_N , В	U_{FA} , В	K_U , %	U_{FB} , В	K_U , %	U_{FC} , В	K_U , %	U_N , В	K_U , %
0,05	80	487,5	14,81	85,3	352	23,76	642	9,47	548	11,54	153	16,4
	180	487,5	15,17	85	350	23,89	650	9,39	550	11,53	150	16,8
	300	487,7	15,25	85	350	23,93	650	9,37	550	11,54	155,5	15,97
0,1	180	488	14,23	85,5	344	24,6	650	9,2	557	11,0,5	158	15,38
0,15	180	488	12,97	85,35	338,3	26,8	650	9,52	570	11,17	161	15,51
0,5	180	488	12,33	85,45	310	40,6	631	10,96	647	10,61	177,5	14,95

Таблица П1.25 – Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении человека к фазе А на участке ТР – ПЧ энергопоезда

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС			Коэффициенты $K_{I(n)}$ гармонических составляющих тока				
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h,max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h,эдс}$, мА·с	3-я	5-я	6-я	7-я	9-я
0,05	80	158	63	132	1,08	71,2	38,8	4,5	2	6	11
	180	160	60	125,5	1,07	67,14	48	5	3	8	16
	300	162	58	124	1,06	66,8	53	5	3	8	16,5
0,1	80	200	63	129	1,07	69	84	12,5	4	17	9
	180	200	60	124,2	1,06	66	114	16	6	24	13,5
	300	200	59	122,4	1,06	64,8	128	17,5	6,5	27,5	16
0,15	80	228	72,2	128,5	1,07	68,7	100	16	4	15	6
	180	227	70	127,7	1,07	67,9	119	17,5	4	18	7
	300	227	69	122	1,06	64,7	122	19,5	4	18	7
0,5	80	400	181	128	1,06	67,8	50	3,2	0,7	3	1,3
	180	400	183	123	1,06	64,3	50,5	3,2	0,7	3,1	1,35
	300	400	184	121	1,06	64,1	50,4	3,4	0,7	3,2	1,4

Таблица П1.26– Параметры режима однофазной утечки тока в короткой комбинированной сети (2) без компенсатора

Параметры изоляции		Токи утечки					Напряжения фаз сети и нейтрали				k_{NU}
C_I , мкФ	R_I , кОм	i_A , мА	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_0 , мА	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_0 , В	
0,05	180	55	30	11,5	11,5	35	30	687	690	162	0,96
0,15		110	36,9	33,3	35,2	37,3	36,5	700	740	170	0,95
0,5		300	187	111	145	42	184	710	925	195	0,8
1		600	428	181	341	42,5	406	575	1100	200	0,63

Таблица П1.27 – Параметры УЗО при однофазной утечке тока в короткой комбинированной сети (2) без компенсатора

C_I , мкФ	R_I , кОм	I_{FA} , мА	I_{FB} , мА	I_{FC} , мА	I_0 , мА	U_{FA} , В	U_{FB} , В	U_{FC} , В	U_0 , В	K_{NU} (%)
0,05	180	8,5	27,3	22,5	35,1	185	639	530	162	0,65
0,15		7,4	27,4	23,8	37,2	157	640	555	171	0,75
0,5		5,25	26,4	28	42,5	97,5	617	654	195	0,85
1		10	21,4	30,9	42,5	241	500	720	200	0,65

Таблица П1.28 – Параметры тока однофазной утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС

при прикосновении человека к фазе А на участке ТР – КЛ – ПЧ Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС		
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h.max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с
0,05	180	55	30	120	1,1	66
0,15		110	36,9	120	1,05	63
0,5		300	187	120	1,04	62,4
1		600	428	120	1,04	62,4

Таблица П1.29 – Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС
при прикосновении человека к фазе А на участке ПЧ-АД

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС			Коэффициенты $K_{I(n)}$ гармонических составляющих тока				
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h.max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с	3-я	5-я	6-я	7-я	9-я
0,05	300	440	123,2	124	2,8	173,6	45	9	3	18	24
0,15		500	125	125	2,8	175	135	19	7	19	10
0,5		610	185,5	167	2,8	234	59	6	1	4	1,2
0,5 (комп.)		510	152	153	2,8	214	-	-	-	-	-
1		725	267,7	250	2,8	350	33	4	0,05	3	1
1 (комп.)		655	170	155	2,8	217	-	-	-	-	-

Таблица П1.30 – Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении человека на участке звена постоянного тока блока ТР-КЛ-ПЧ-АД

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС		
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h,max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с
0,05	180	334	120	127	1,07	64,2
0,15		334	120	127	1,06	64,2
0,5		334	120	127	1,07	68
0,5 (комп.)		334	120	130	1,06	68,9
1		333,5	119	120	1,07	64,2
1 (комп.)		335	125	135	1,06	71,55

Таблица П1.31 – Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении человека к фазе А на участке ТР-КЛ- ПЧ

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС			Коэффициенты гармонических составляющих тока	
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h,max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с	3-я	K_I (%)
0,5	180	295	186	187	1,0		0,06	0,07
0,5 (комп.)		128	90	193 (пик) 130	1,03		32	33,7
1		650	427,3	120	1,03		0,058	0,06
1 (комп.)		460	134	505 (пик) 132	1,01		0,25	0,57

Таблица П1.32– Параметры режима однофазной утечки тока в длинной комбинированной сети

Параметры изоляции		Токи утечки					Напряжения фаз сети и нейтрали				k_{NU}
C_I , мкФ	R_I , кОм	i_A , мА	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_0 , мА	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_0 , В	
Утечка тока на участке до преобразователя частоты											
0,1		105	36,5	15,3	15,7	36	137	617	647	177	0,79
0,5		320	181,6	60	75	41,2	180	663	867	200	0,79
0,5 (комп)		230	90	64	70	38,2	90	704	800	187	-
1		570	371	230	260	39	365	660	1030	190	0,64
1 (комп)		425	106	244	253	35	103	833	930	174	-
Утечка тока на участке после преобразователя частоты											
0,1	180		31,4	17,9	17,9	29	30,6	549	566	149	0,94
0,5		255	145,5	50,5	62	33	143,5	532	695	164	0,79
0,5 (комп)		180	74	52	57	30,5	72,5	565	640	154	-
1		385	296	220	240	31,5	290	587	860	158	0,66
1 (комп)		350	87,7	231	225	28,6	84	707	780	145	-

Таблица П1.33 – Параметры тока и напряжения в ветвях фильтра УЗО при однофазной утечке тока в протяженной ПКЭС

C_I , мкФ	R_I , кОм	I_{FA} , мА	I_{FB} , мА	I_{FC} , мА	I_0 , мА	U_{FA} , В	U_{FB} , В	U_{FC} , В	U_0 , В	K_{NU} (%)
Утечка тока на участке до преобразователя частоты										
0,1	0,51180	8	27,3	23,2	36	264	667	575	177	0,6
0,5		5,64	26	27,7	41,2	230	640	679	200	0,66
0,5 (комп)		6,5	27	25,3	38	240	660	620	187,4	-
1		11,2	20,4	29,6	39	222	515	720	190	0,69
1 (комп)		7	26	24,6	35	247	636	607	174	-
Утечка тока на участке после преобразователя частоты										
0,1	180	9,9	25	21	29	303	540	625	149	0,51
0,5		7,8	23,8	25,4	33	260	590	625	164	0,58
0,5 (комп)		8,6	24,7	23	30,5	273	615	571	154	-
1		11,7	19,2	27	31,5	332	489	664	158	0,5
1 (комп)		9	24	23	28,6	281	600	565	145	-

Таблица П1.34 – Результаты измерений коэффициентов n -ых гармонических составляющих тока и суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока в цепях утечки через изоляцию протяженной ПКЭС

Параметры изоляции		Гармоники – $K_{I(n)}$ (%), K_I (%) симметричный режим утечки					Гармоники – $K_{I(n)}$ (%), K_I (%) однофазный режим утечки				
C_I , мкФ	R_I , кОм	3	5	7	9	K_I (%)	3	5	7	9	K_I (%)
Утечка тока на участке до преобразователя частоты											
0,1	180	34,5	2,6	3,6	24	42,5	64,1	7,4	2,9	1,4	64,8
0,5	180	52	4,3	1,6	1,9	52,1	19	1,2	0,7	0,5	19,65
1	180	236 DC	-	-	-	236 DC	8,05	0,5	0,4	0,15	8,15
Утечка тока на участке после преобразователя частоты											
0,1	180	34	4,8	7,3	68	85,8	62	14,5	5,8	4,6	64,2
0,5	180	65,5	20	3,3	4,3	65,6	21,5	2	1	0,7	21,7
1	180	289,4 DC	-	-	-	289,4 DC	9,7	0,8	0,3	0,35	9,76

Таблица П1.35 – Результаты измерений коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения и суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в цепях утечки через изоляцию протяженной ПКЭС

Параметры изоляции		Гармоники – $K_{U(n)} (\%)$, $K_U (\%)$ симметричный режим утечки					Гармоники – $K_{U(n)} (\%)$, $K_U (\%)$ однофазный режим утечки				
C_L , мкФ	R_L , кОм	3	5	7	9	$K_U (\%)$	3	5	7	9	$K_U (\%)$
Утечка тока на участке до преобразователя частоты											
0,1	180	12,1	0,55	0,55	2,8	14,9	64	7,3	2,8	1,3	64,7
0,5	180	17,3	1	0,2	0,2	17,3	19,2	1,1	0,6	0,4	19,9
1	180	234,5 DC	-	-	-	234,5 DC	7,42	0,4	0,3	0,1	7,46
Утечка тока на участке после преобразователя частоты											
0,1	180	11,8	1	1,2	8	14,8	62	15	5,6	4,5	64
0,5	180	20,9	4	0,5	0,5	21,9	21	1,9	0,9	0,55	21,13
1	180	96,5 DC	-	-	-	96,5 DC	8,8	0,65	0,22	0,2	8,93

Таблица П1.36 – Параметры тока однофазной утечки в протяженной ПКЭС за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС			Коэффициенты гармонических составляющих тока	
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h.max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с	3-я	K_I (%)
Утечка тока на участке до преобразователя частоты								
0,1	180	105	36,5	124	1,06	65,7	64,1	64,8
0,5		320	181,6	182	1,04	94,5	19,6	19,65
0,5 (комп)		230	90	293 имп. 0,05 с 118	1,04	61,3	44,1	44,2
1		570	371	372	1,05	195	8,05	8,15
1 (комп)		425	106	460 имп.0,05 с 130	1	65	4,9	5,15
Утечка тока на участке после преобразователя частоты								
0,1	180	83	31,4	30	2,4	36	62	64,2
0,5		255	145,5	145,6	2,3	172	19	19,65
0,5 (комп)		180	74	76	2,4	91,2	44,2	44,6
1		385	226	300	2,3	345	9,7	9,76
1 (комп)		350	87,7	86	2,4	103,2	34,57	34,7

Таблица П1.37 – Параметры тока утечки за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС при прикосновении человека на участке звена постоянного тока ПЧ с АИН протяженной ПКЭС

Параметры изоляции		Ток утечки за время срабатывания УЗО		Режим генерирования обратной ЭДС		
C_I , мкФ/фазу	R_I , кОм/фазу	i_{max} , мА	I_{h1} , мА	$I_{h.max}$, мА	$t_{эдс}$, с	$Q_{h.эдс}$, мА·с
0,1	180	618	114	128	1,45	92,8
0,5		619	114	129	1,45	93,5
0,5 (комп.)		620	114	127	1,45	92,1
1		619	115	128	1,46	93,4
1 (комп.)		620	116	127	1,46	92,7

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 215031

**Устройство автоматической пофазной компенсации
емкостных токов утечки в подземных электрических
сетях**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский технологический
университет "МИСиС" (RU)*

Авторы: *Пичуев Александр Вадимович (RU), Петров Вадим
Леонидович (RU)*

Заявка № 2022127635

Приоритет полезной модели **25 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **25 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **25 октября 2032 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020662614

Программа расчета режимов утечки тока через изоляцию
при проектировании рудничной участковой
электрической сети

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (RU)*

Автор: *Пичуев Александр Вадимович (RU)*



Заявка № 2020661939

Дата поступления 08 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 октября 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023617964

Программа моделирования режимов утечки тока через
изоляцию в шахтной подземной электрической сети с
частотно-регулируемым асинхронным
электродвигателем

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Пичуев Александр Вадимович (RU), Шевырёв Юрий
Вадимович (RU), Шевырева Наталия Юрьевна (RU)*



Заявка № 2023616937

Дата поступления 11 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618122

Программа моделирования нестационарных процессов
в шахтной подземной электрической сети с
асинхронным частотно-регулируемым электроприводом
с автономным инвертором напряжения

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (ННТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Петров Вадим Леонидович (RU), Пичуев Александр
Вадимович (RU)*



Заявка № 2023616913

Дата поступления 11 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618334

Программа моделирования устройств контроля
изоляции и защитного отключения с автоматическим
компенсатором и активно-вентильным фильтром
присоединения к шахтной подземной электрической
сети

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (ННТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Пичуев Александр Вадимович (RU), Британ Игорь
Алексеевич (RU), Солдайкин Николай Владимирович (RU)*



Заявка № 2023616984

Дата поступления 11 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618507

Программа для исследования влияния процесса
низкочастотной поляризации в изоляции шахтной
подземной электрической сети на электробезопасность

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)*

Автор(ы): *Пичуев Александр Вадимович (RU)*



Заявка № 2023617041

Дата поступления 11 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618736

Программа для исследования гармонических
составляющих напряжения в цепях утечки тока через
изоляцию подземной комбинированной электрической
сети

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Петров Вадим Леонидович (RU), Пичуев Александр
Вадимович (RU), Париевский Дмитрий Евгеньевич (RU)*



Заявка № 2023616985

Дата поступления 11 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

«Утверждаю»

Генеральный директор
ООО «Электротехническая промышленная компания»,
действительный член Академии электротехнических наук



Б.И. Абрамов

25 мая 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
ПИЧУЕВА Александра Вадимовича на тему
**«ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ»**,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

В научно-технических разработках ООО "Электротехническая промышленная компания" при проектировании новых поколений электротехнических комплексов горных машин и установок внедрены и используются следующие результаты диссертационной работы Пичуева А.В., имеющие научную и практическую значимость.

1. Методы пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостного тока утечки, представляющих теоретическую основу реализации новых принципов создания способов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий.

2. Математические модели подземных электрических сетей горных предприятий, учитывающих параметры изоляции, устройств защитного отключения, преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения, фильтро-компенсирующих устройств, токоограничивающих реакторов, синусных фильтров и асинхронных электродвигателей.

3. Структурные модели подземных комбинированных электрических сетей для установления и анализа спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и токов в цепях утечки, определения оптимальных параметров настройки преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения и средств защитного отключения в соответствии нормативными требованиями безопасной эксплуатации шахтного электрооборудования, оптимальные параметры фильтрокомпенсирующих устройств, синус-фильтров и токоограничивающих реакторов.

Зам. генерального директора
по развитию бизнеса,
кандидат технических наук

Иванов А.Г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГП «Шахтоуправление «Луганское»
А.К. Циминтия
_____» 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
ПИЧУЕВА Александра Владимировича на тему:
«ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

С учетом общей тенденции к росту мощности машин очистного забоя и перспективы перехода подземных участковых электрических сетей на напряжение 3,3 – 6 кВ актуальным представляется решение вопросов, направленных на обеспечение эффективности работы средств контроля изоляции и защитного отключения. При проектировании шахтных электрических сетей, оборудованных электротехническими комплексами и системами нового технического уровня, использованы следующие результаты диссертационной работы Пичуева А.В., имеющие научную и практическую значимость.

1. Математическое и программное обеспечение для анализа высших гармонических составляющих напряжения и тока в подземных комбинированных электрических сетях, реализующее комплексный учет параметров средств обеспечения качества электроэнергии, устройств защитного отключения, изоляции электрической сети, а также параметры преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения и взрывозащищенных асинхронных электродвигателей.

2. Комплекс алгоритмов и программ на основе методического обеспечения для анализа режимов утечки тока в подземных электрических сетях на основе схем замещения, учитывающих параметры изоляции, устройств защитного отключения, преобразователей частоты, фильтро-компенсирующих устройств, токоограничивающих реакторов, синусных фильтров и взрывозащищенных асинхронных электродвигателей.

3. Методическое и программное обеспечение по оценке степени опасности режимов утечки тока в подземных электрических сетях промышленной частоты, реализующее комплексный учет параметров изоляции, устройств защитного отключения, в соответствии с нормативными требованиями по безопасности эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования.

Зам. главного инженера по производству
и перспективному развитию
ГП «Шахтоуправление «Луганское»
ГУП ЛНР «РТК «Востокуголь»



Д.С. Чепурной



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ГеоСпецстрой»

Арсеньев И.Д.

2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
ПИЧУЕВА Александра Владимировича на тему:
«ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

При строительстве протяжных коллекторных тоннелей с использованием нескольких современных проходческих комплексов, возникает необходимость определения параметров и настройки средств защитного отключения электрических сетей; частотно-регулируемых электроприводов горных машин и вспомогательных электроустановок, а также технических средств обеспечения качества электроэнергии. Результаты диссертационной работы Пичуева А.В., имеющие научную и практическую значимость, были использованы на стадии проектирования и сооружения объектов городского подземного строительства, т.к. содержат:

1. Методическое и программное обеспечение по оценке степени опасности режимов утечки тока в подземных электрических сетях промышленной частоты, учитывающее параметры изоляции и устройств защитного отключения, а также режимы работы электродвигателей, в соответствии нормативными требованиями по безопасной эксплуатации электроустановок.
2. Методическое и программное обеспечение для анализа гармонического состава напряжения и тока в подземных электрических сетях с регулируемой частотой, позволяющее выполнить расчет и обоснование параметров настройки средств обеспечения качества электроэнергии, устройств защитного отключения, изоляции электрической сети, а также параметры преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения и асинхронных электродвигателей.

Главный энергетик