

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



На правах рукописи

УДК 004.5: 622.25.:621.3

Маренич Мария Константиновна

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

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

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Гуляева Ирина Борисовна

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ...	15
1.1 Специфика построения системы электроснабжения участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения.....	15
1.2. Ёмкость изоляции электрической сети участка шахты как фактор формирования тока в цепи заземления	30
1.3 Анализ функциональных возможностей аппаратуры автоматического защитного отключения шахтных участков электрических сетей.....	39
1.3.1 Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю.....	42
1.3.2 Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю.....	56
1.4 Анализ специфики функционирования автоматического защитного отключения комбинированных шахтных участков электрических сетей.....	66
1.5 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования.....	71
РАЗДЕЛ 2 ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА ШАХТЫ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ.....	76
2.1 Предпосылки технической реализации альтернативной концепции построения системы электроснабжения участка шахты.....	76
2.2 Локализация контура заземления как способ повышения безопасности эксплуатации системы электроснабжения участка шахты.....	84
2.3 Обоснование способа определения места повреждения шахтного гибкого кабеля.....	96
2.4 Управление коммутацией в цепи нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции как способ повышения эффективности защитного отключения электрической сети.....	102

2.5 Выводы по разделу 2	110
РАЗДЕЛ 3 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ КОНТАКТА ФАЗЫ С ОБЪЕКТОМ КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАЩИТНЫМ ОТКЛЮЧЕНИЕМ СИЛОВЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ	113
3.1 Обоснование структуры и исследование функциональных возможностей датчика контакта «фаза - корпус» электроустановки	113
3.2 Адаптация схемы магнитного пускателя к выполнению защитной функции при возникновении контакта фазы сети с объектом контроля	116
3.3 Техническая реализация процесса формирования защитной функции в структуре «пускатель - двигатель» при неприсоединении к заземлению центрального провода кабеля	126
3.4 Обоснование способа блокировки отключенного состояния коммутационного аппарата в процессе реализации защитной функции в структуре многомашинного электротехнического комплекса	129
3.5 Демонстрационная версия устройства защитного отключения силового присоединения в контексте практической реализации результатов исследований	136
3.6 Синтез структуры комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений при его оснащении устройствами выявления контакта фазы с объектом защиты	139
3.7 Выводы по разделу 3	142
РАЗДЕЛ 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	145
4.1 Корректировка схемы и обоснование параметров компонентов средства защитного отключения при локализации датчика контакта фазы в структуре асинхронного двигателя	145
4.2 Разработка схем присоединения устройств выявления контакта фазы с объектом контроля к узлам управления силовыми коммутационными аппаратами	155

4.3. Адаптация функции предварительного контроля величины сопротивления изоляции кабеля к условиям локализации средств защитного отключения.....	158
4.4 Выводы по разделу 4.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	166
Приложение А Копии документов о внедрении результатов исследований.....	180

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

Таким образом, несмотря на функционирование в режиме изолированной нейтрали трансформатора, применение заземления корпусов электроустановок, и средств защиты от утечек тока на землю, шахтная участковая электрическая сеть априори представляет опасность электропоражения человека, а функция защиты от утечек тока на землю сводится не к устранению электропоражающего фактора, а к ограничению количества электричества в теле человека в условиях действия

электропоражающего фактора, обусловленного, в частности, компоновочными и техническими решениями при формировании структуры СЭС участка шахты.

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

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

О.А. Демченко, Л.А. Муфеля. Этим доказывается возможность внесения принципиальных изменений в саму концепцию построения СВЭ шахты. Аналогично этому, целесообразна и корректировка системы электроснабжения участка шахты на основе совершенствования методов и средств автоматического защитного отключения силовых присоединений, в контексте создания ограничительного эффекта применительно к формированию электропоражающего фактора.

Связь с научными программами, планами, темами.

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

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности функционирования системы электроснабжения участка шахты за счёт обоснования и практической реализации модифицированной алгоритмической базы и технических средств управления процессами автоматического защитного отключения.

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

– анализ специфики функционирования СЭС участка шахты в контексте обеспечения защиты персонала от поражения электрическим током и проблемных

вопросов в области обеспечения безопасности эксплуатации рудничного электрооборудования;

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

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

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

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

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

Идея работы состоит в дооснащении комплекса средств автоматического защитного отключения СЭС участка шахты устройствами выявления контакта фазы с объектом контроля, управляющими защитным отключением силовых присоединений и локализуемыми в структурах АД и коммутационных аппаратов, что позволяет распространить функцию защитного отключения на состояния контакта фазы электрической сети с корпусом электроустановки, исключая при этом применение центральных проводов кабелей электропитания в качестве

проводников заземления АД и снижая, тем самым, параметры электропоражающего фактора частичным устранением ёмкостной проводимости изоляции между фазами электрической сети и землёй.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: основных положений электротехники, теории электрических цепей; методов систематизации, компьютерного моделирования, теории эксперимента; включая проведение натуральных экспериментов, теории переходных процессов; теории автоматического управления процессами и объектами, методов математического моделирования, использования цифровых измерительных устройств в условиях экспериментов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

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

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

3) Обоснован способ диагностирования – определения места повреждения экранированного кабеля, основанный на применении петлевого метода в условиях

эксплуатации кабеля при неприсоединении к заземлению его центрального провода.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается:

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

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

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

Практическая ценность результатов исследований состоит в следующем:

– обоснование технических решений в контексте подавления электропоражающего фактора при эксплуатации СЭС участка шахты и совершенствования средств автоматического защитного отключения её силовых присоединений;

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

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

Научные положения, выносимые на защиту.

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

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

Факторами, предопределяющими ошибочное выявление (и закорачивание на землю) в качестве повреждённой фазы при возникновении в СЭС участка

шахты цепи утечки тока на землю являются величины: ёмкости изоляции сети; частоты напряжения сети; электрической проводимости цепи утечки тока на землю.

3) Установлено, что техническим решением в области повышения безопасности эксплуатации СЭС участка шахты и распространения её функциональности на технологическое оборудование повышенных уровней мощности является отказ от применения центральных проводов кабелей электропитания в качестве проводников заземления металлических корпусов АД при дополнении комплекса средств автоматического защитного отключения устройствами выявления контакта фазы с объектом контроля, управляющими защитным отключением силовых присоединений и локализуемыми в структурах АД и силовых коммутационных аппаратов.

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

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

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

Личный вклад соискателя. Все разделы и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи

работы и её реализации, в разработке испытательных и демонстрационных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований.

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

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

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Специфика построения системы электроснабжения участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения

Эксплуатация шахтных участков электрических сетей осуществляется в условиях формирования и действия в них электропоражающего фактора, обусловленного относительно высокими уровнями номинальных линейных напряжений (660 В, либо 1140 В) и наличием активных и ёмкостных проводимостей (между фазами сети и землёй) изоляции кабелей. При прикосновении человека, находящегося в контакте с землёй, к фазному проводнику, находящемуся под напряжением сети, ток утечки на землю через тело человека (при его сопротивлении $R_{ч} = R_{ут} = 1,0$ кОм) и количество электричества в теле человека могут существенно превышать предельно допустимые значения ($I_{ут} = 25$ мА, $q = 50$ мА·с, соответственно) [1]. В качестве мер противодействия электропоражающему фактору предусмотрены:

- заземление металлических корпусов электрооборудования;
- реализация режима изолированной нейтрали трансформатора;
- применение автоматической защиты от утечек тока на землю, включая технические средства компенсации ёмкостных токов утечки, а также средства выявления и ускоренного замыкания на землю повреждённой фазы с целью ограничения количества электричества в теле человека на уровне $q < 50$ мА·с.

Необходимость заземления металлических корпусов силового электрооборудования участка шахты предопределила общую концепцию компоновки системы его электроснабжения [2]. Согласно ей, и учитывая нестационарность перемещаемых электромеханических объектов (очистные, проходческие комбайны, скребковые конвейеры, ручные электросвёрла и т.п.),

заземление их электродвигателей осуществляется присоединением ЦП кабеля электропитания к корпусу асинхронного двигателя (АД) и заземлённому корпусу соответствующего пускателя. В этом случае ЦП кабеля и металлический корпус пускателя выполняют функцию заземляющих проводников. В соответствии с конструкцией кабеля (ГРШЭ; КГЭШ и т.п.) его ЦП при этом охватывается по всей своей длине экранами (из полупроводящей резины) силовых фазных проводов [3, 4]. Заземление нестационарного рудничного электрооборудования посредством заземляющих жил (ЦП) кабелей согласуется с п.1.4.1 [5], согласно которому «для передвижных машин и забойных конвейеров должен предусматриваться непрерывный автоматический контроль заземления путём использования заземляющей жилы». В то же время, это противоречит п.1.4.2 этого же нормативного документа, согласно которому «не допускается использовать корпуса электрооборудования в качестве заземляющих проводников». Этому положению нормативного документа противоречит и способ подключения к заземлению схемы участкового аппарата защиты от утечек тока на землю (АЗ) присоединением контакта заземления его схемы не непосредственно к элементу заземления, а к металлическому корпусу участковой комплектной трансформаторной подстанции (КТП).

Помимо реализации заземляющей функции, заземление ЦП гибкого экранированного кабеля позволяет выявить повреждения изоляции кабеля как возникновение повышенной проводимости в цепи оперативного тока аппарата защиты от утечек тока на землю (АЗ), размещённого в структуре шахтной КТП по цепи: «фазный провод кабеля – полупроводящий экран – ЦП кабеля – земля». Однако непосредственный контакт ЦП с экранами изоляции фазных проводов по всей длине кабеля предполагает возникновение активных и ёмкостных проводимостей изоляции между фазами и ЦП, а заземление последнего обуславливает формирование указанных проводимостей уже между фазами сети и землёй. И, если активное сопротивление изоляции кабеля определяется её техническим состоянием и обычно составляет весьма высокие величины, то ёмкость изоляции относится уже к паспортным характеристикам кабеля и

определяется его сечением и длиной [6, 7]. Применение на участке шахты совокупности гибких кабелей электропотребителей означает параллельное подключение (между собой) активных сопротивлений и ёмкостей их изоляции, то есть существенное увеличение как активной, так и ёмкостной проводимости фаз на землю. Тенденция к применению всё более мощных электропотребителей и, как следствие, - увеличению протяжённости и сечений силовых кабельных присоединений предопределяет ещё большее увеличение ёмкостной проводимости изоляции между фазами сети и землёй.

Таким образом, именно изоляцию кабельной сети участка шахты вследствие специфики размещения и применения ЦП гибких кабелей следует рассматривать в контексте формирования фактора риска электропоражения человека при касании к фазе сети, находящейся под напряжением. В связи с этим актуально исследование специфики построения СЭС участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения.

Типовая структура СЭС участка шахты помимо КТП включает автоматические выключатели (АВ); магнитные пускатели МП). На рисунке 1.1 изображены силовые контактные группы 1-го и n -го пускателя; асинхронные двигатели M_1 ; M_n , соответственно, 1-го и n -го потребителя; заземления z_1 ; z_n , соответственно, 1-го и n -го силовых присоединений [8, 9, 10].

Электропоражение персонала в этом случае может быть вызвано:

- контактом человека $R_{ч1}$, стоящего на земле, с корпусом АД (обозначен пунктиром) - при возникновении контакта фазного проводника с корпусом АД;
- контактом человека $R_{ч2}$, стоящего на земле, с фазным проводником, находящимся под напряжением сети.

В соответствии с этим, защита персонала от электропоражения в электроустановках участка шахты обеспечивается:

- в первом случае – заземлением корпусов электрооборудования, включая электрическое присоединение корпусов перемещаемого электрооборудования к корпусам стационарного посредством ЦП кабелей электропитания;

– во втором случае – применением (в структуре КТП участка шахты) аппарата автоматической защиты (АЗ) от утечек тока на землю.

Отличаясь простотой реализации, способ заземления, имеет ряд проблемных позиций. Так, в условиях эксплуатации многомашинного электротехнического комплекса и вследствие повреждения изоляции существует вероятность контакта разных фаз с заземлёнными корпусами разных электроустановок. Тогда участок почвы между ними будет находиться под линейным напряжением ($U_{л}$) сети, что обусловит высокое значение тока в элементах заземления ($I_3 = U_{л} / \Sigma R_3 + R_{п}$), где ΣR_3 – сумма активных сопротивлений последовательно соединённых компонентов цепи заземления; $R_{п}$ – сопротивление почвы между корпусами электроустановок, контактирующими с фазами сети. Здесь может иметь место искрение в контактных соединениях цепи заземления и возникновение электропоражающего фактора – шагового напряжения $\Delta U_{ш}$ – разности потенциалов почвы.

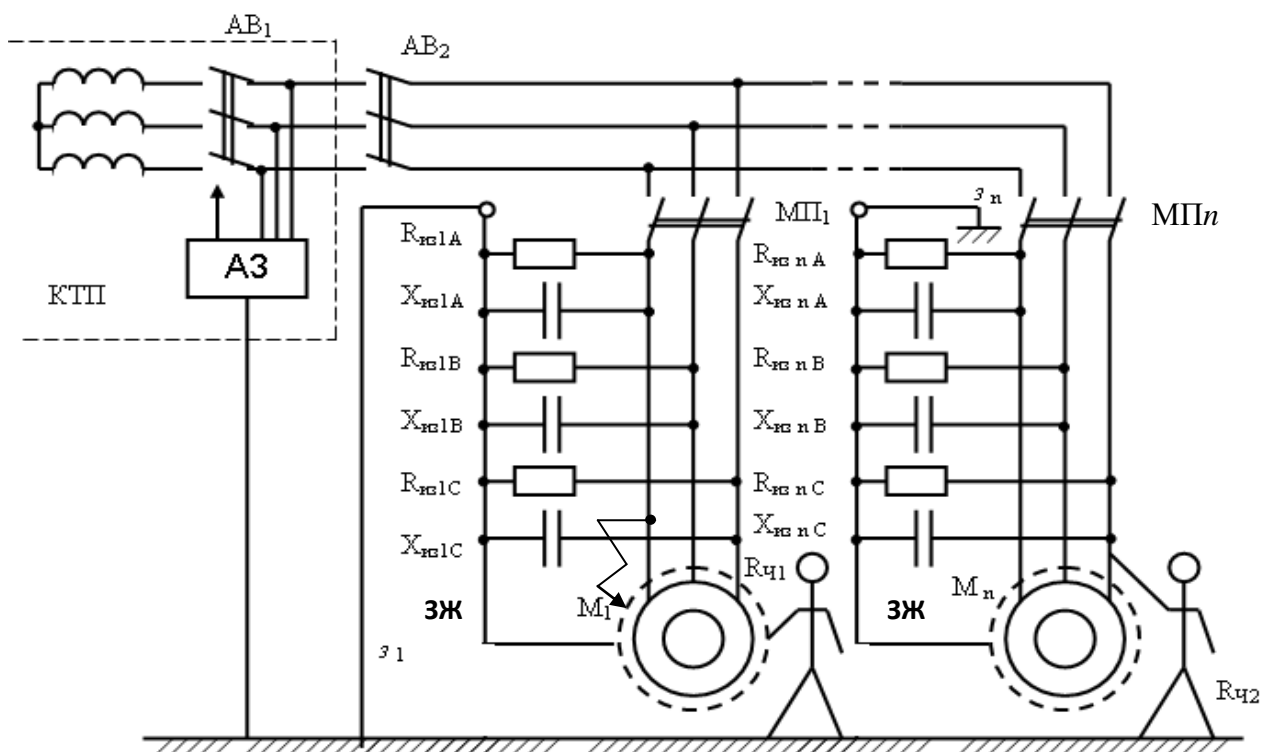


Рисунок 1.1 – Типовая структура системы электроснабжения участка шахты с указанием вариантов формирования фактора электропоражения человека

В процессе эксплуатации СЭС участка шахты следует также учитывать возможность потери защитных свойств заземления при увеличении переходного сопротивления выше допустимого значения ($R_{п. доп.} = 2 \text{ Ом}$), обрыва проводников между корпусами электроустановок и элементами заземляющей сети [11]. Вероятность этого обусловлена выборочным визуальным контролем (при эксплуатации шахтных участков электрических сетей) качества контактов в присоединениях компонентов заземления.

Специфика взаимного расположения силовых жил и ЦП шахтных экранированных кабелей (Рисунок 1.2) предопределяет формирование проводимостей изоляции как между фазными и центральным проводами, так и между смежными фазными проводами. При заземлении ЦП n кабелей электросети участка шахты фактор электропоражения человека (с сопротивлением тела $R_{ут} \approx 1 \text{ кОм}$) при его касании к фазе сети будет формироваться в соответствии со схемой (Рисунок 1.3), где $R_{\phi-\phi}$; $X_{\phi-\phi}$ – соответственно, активные и ёмкостные сопротивления изоляции между фазами кабелей; $R_{\phi-з}$; $X_{\phi-з}$ – соответственно, активные и ёмкостные сопротивления изоляции между фазами и землёй при заземлении ЦП кабелей. С учётом n кабелей, подключенных к выходу (u_A ; u_B ; u_C) трансформатора КТП, общие активное и ёмкостное сопротивление изоляции между k -й комбинацией фаз ($k = 1$; $k = 2$; $k = 3$) вследствие параллельности i -х соединений будут описываться выражениями:

$$R_{\phi-\phi k \Sigma} = \frac{\prod_{i=1}^n R_{\phi-\phi ki}}{\sum_{i=1}^n R_{\phi-\phi ki}}, \quad (1.1)$$

$$X_{\phi-\phi k \Sigma} = \frac{1}{2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-\phi ki}}, \quad (1.2)$$

Общие активное и ёмкостное сопротивления изоляции между k -й фазой ($k = 1$; $k = 2$; $k = 3$) и землёй вследствие параллельности соединений будут описываться выражениями:

$$R_{\phi-3k\Sigma} = \frac{\prod_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}{\sum_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}, \quad (1.3)$$

$$X_{\phi-3k\Sigma} = \frac{1}{2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-3ki}}, \quad (1.4)$$

где $C_{\phi-\phi ki}$ - ёмкость изоляции между k -й комбинацией фаз i -го кабеля;
 $C_{\phi-3ki}$ - ёмкость изоляции между k -й фазой i -го кабеля и землёй (при заземлении ЦП кабелей сети участка); f - частота напряжения сети (Гц).

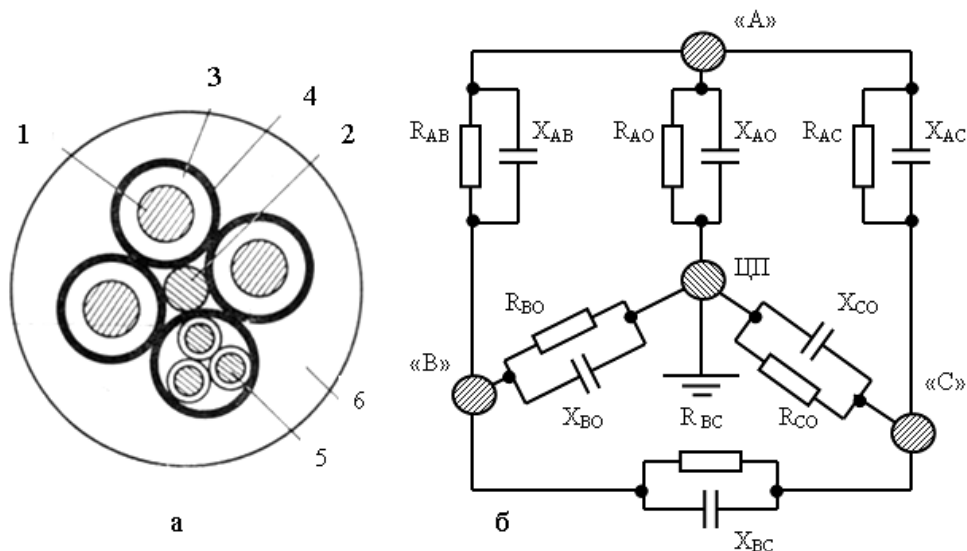


Рисунок 1.2 – Схема взаиморасположения (а) силовых жил 1 и ЦП 2 шахтного кабеля (3 - резиновая изоляция; 4 – электропроводящий экран; 5 – сигнальная жила; 6 – оболочка кабеля) и формирования (б) активных ($g=1/R$) и ёмкостных ($b=1/X$) проводимостей изоляции кабеля при заземлении центрального провода

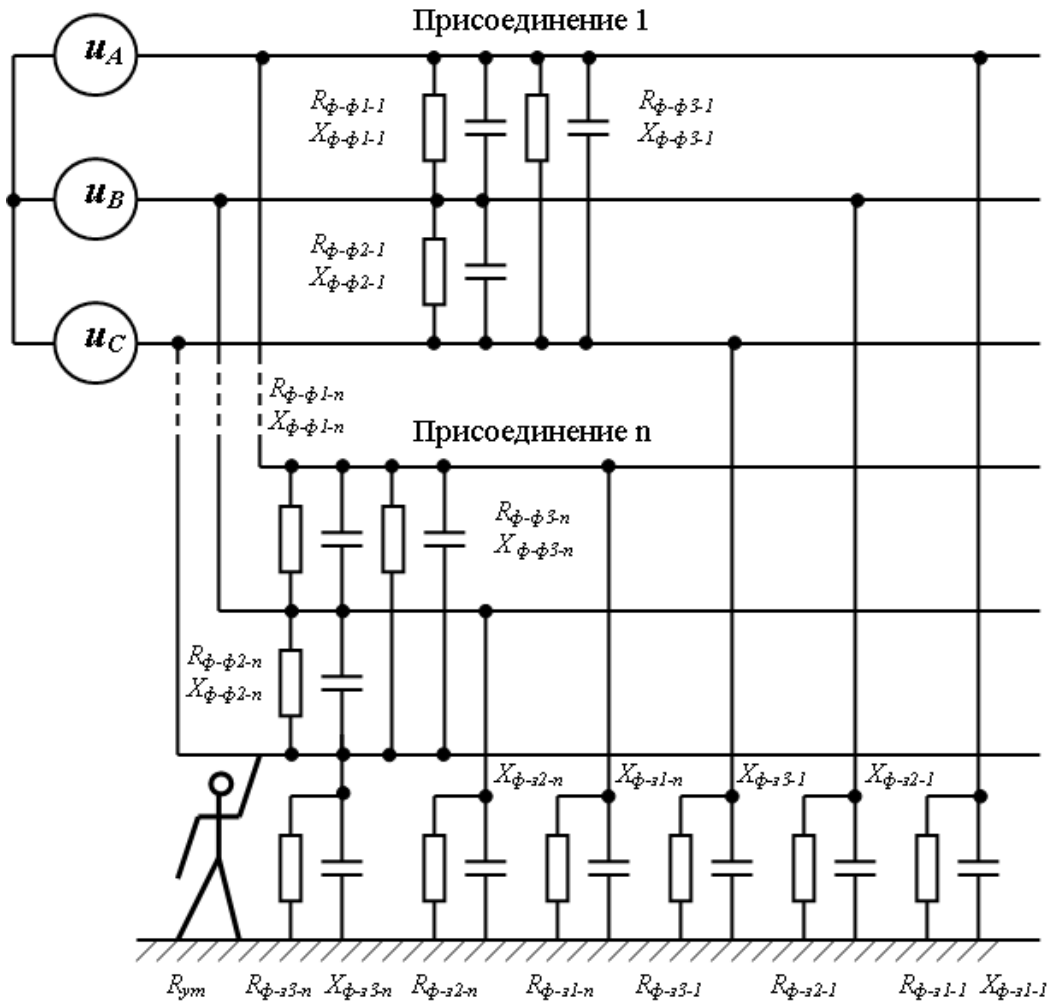


Рисунок 1.3 – Уточнённая схема формирования электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети

Тогда общие активная и ёмкостная проводимости изоляции между k -й фазой ($k = 1; k = 2; k = 3$) и землёй будут описываться выражениями:

$$G_{\phi-3k\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}{\prod_{i=1}^n R_{\phi-3ki}}, \quad (1.5)$$

$$B_{\phi-3k\Sigma} = 2\pi f \sum_{i=1}^n C_{\phi-3ki}, \quad (1.6)$$

В свете исследования степени влияния проводимости изоляции кабелей на формирование электропоражающего фактора это даёт основание представить

СЭС участка шахты комбинацией активно-ёмкостной нагрузки трансформатора КТП, первая составляющая которой является междуфазными соединениями (присоединения к фазам по схеме «треугольник») $R_{\phi-\phi k\Sigma}$; $C_{\phi-\phi k\Sigma}$, а вторая – соединением в «звезду» цепей $R_{\phi-3k\Sigma}$; $C_{\phi-3k\Sigma}$ (Рисунок 1.4). Общая точка «0» схемы «звезда» представляет собой контур заземления ЦП кабелей сети участка. Прикосновение человека к фазе сети интерпретируется присоединением активного сопротивления $R_{yt} = 1$ кОм между фазой (точка «1») и точкой «0». Импеданс каждого линейного присоединения в схеме «треугольник» и каждого фазного присоединения в схеме «звезда» будет составлять, соответственно:

$$Z_{\phi-\phi k\Sigma} = R_{\phi-\phi k\Sigma} / \sqrt{1 + (2\pi f C_{\phi-\phi k\Sigma} R_{\phi-\phi k\Sigma})^2}, \quad (1.7)$$

$$Z_{\phi-3k\Sigma} = R_{\phi-3k\Sigma} / \sqrt{1 + (2\pi f C_{\phi-3k\Sigma} R_{\phi-3k\Sigma})^2}, \quad (1.8)$$

В случае появления цепи утечки ($R_{yt} = 1$ кОм) тока с фазы на общую точку схемы «звезда» (что соответствует прикосновению человека к фазе сети при заземлённых центральных проводах кабелей), импеданс в соответствии с рисунком 1.4 - первого фазного присоединения преобразуется к виду:

$$Z_{\phi-3\Sigma 1} = (R_{yt} R_{\phi-31\Sigma} / (R_{yt} + R_{\phi-31\Sigma})) / \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f R_{yt} R_{\phi-31\Sigma} C_{\phi-31\Sigma}}{(R_{yt} + R_{\phi-31\Sigma})} \right)^2}, \quad (1.9)$$

а комплексная проводимость фазного присоединения преобразуется к виду:

$$Y_{\phi-31\Sigma} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f R_{yt} R_{\phi-31\Sigma} C_{\phi-31\Sigma}}{(R_{yt} + R_{\phi-31\Sigma})} \right)^2} / (R_{yt} R_{\phi-31\Sigma} / (R_{yt} + R_{\phi-31\Sigma})), \quad (1.10)$$

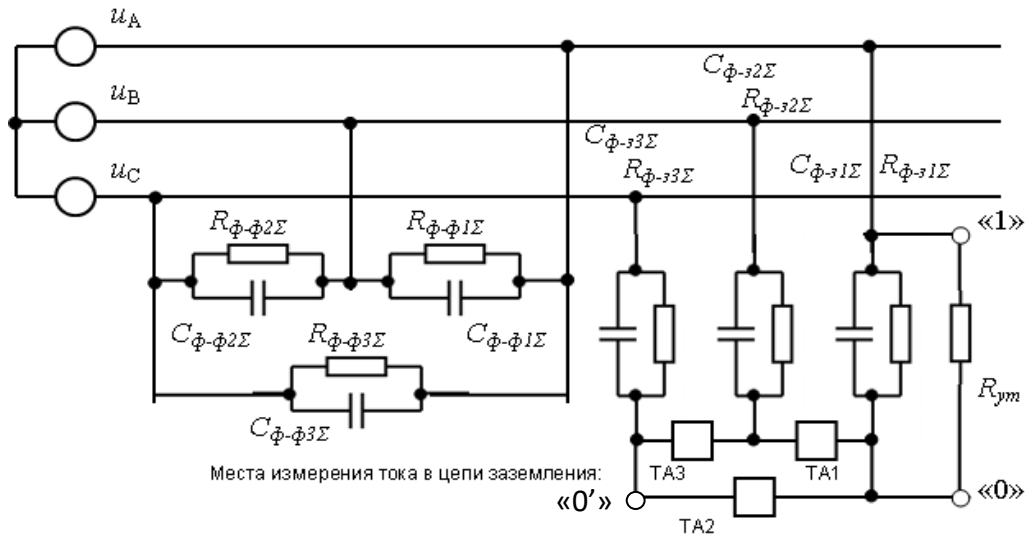


Рисунок 1.4 – Схема распределения тока, обусловленного активной и ёмкостной проводимостями изоляции кабелей в сети заземления технологического участка между обобщёнными точками заземления «0» и «0'»

Полученные выражения раскрывают распределение токов в ветвях, сформированных проводимостями изоляции кабелей, включая степень влияния импедансов изоляции цепей «фаза – земля» на величину тока в цепи $R_{ум}$, а также на величину тока в точке соединения в «звезду» активно-ёмкостных проводимостей, определяемых импедансами $Z_{\phi-3k\Sigma}$ (при $k = 1; k = 2; k = 3$).

Зависимость тока i и величины количества электричества q в цепи однофазной утечки на землю ($R_{ум} = 1$ кОм) от величины ёмкости изоляции $C_{из}$ кабелей представлена осциллограммами и диаграммами в соответствии с рисунком 1.5. На диаграммах в, д (Рисунок 1.5) моментом времени t_1 ограничен интервал времени в 0,17 с. протекания тока утечки через человека, что соответствует продолжительности отработки отделения от сети энергетического потока питающей КТП шунтированием «повреждённой» фазы на землю через сопротивление $R = 100$ Ом [12] в процессе отключения сети. Представленные параметры $q = f(C_{из})$ свидетельствуют о наличии неблагоприятных условий электропоражения. Так в сети линейного напряжения 660 В при $C_{из} \geq 0,8$ мкФ/фазу параметр $q > 37$ мА·с, что сопоставимо с предельно допустимым $q = 50$ мА·с. В сети линейного напряжения 1140 В параметр $q > 50$ мА·с при $C_{из} > 0,6$ мкФ/фазу. При этом не учитывается последующее

увеличение параметра q от воздействия обратных ЭДС АД потребителей, переходящих в режим выбега.

Таким образом, присоединение ЦП гибких кабелей к сети заземления СЭС участка шахты создаёт эффект, когда ёмкостные проводимости между фазными и центральным проводами кабелей превращаются в ёмкостные проводимости между фазами сети и землёй. В ещё бóльшей степени это касается специфики формирования ёмкостной проводимости изоляции кабеля с шестью силовыми фазными проводами, где ёмкость между фазными проводами и ЦП в 1,5 раза выше аналогичного параметра трёхжильного кабеля (три силовых фазных провода) с той же суммарной площадью сечения силовых фазных проводов [13].

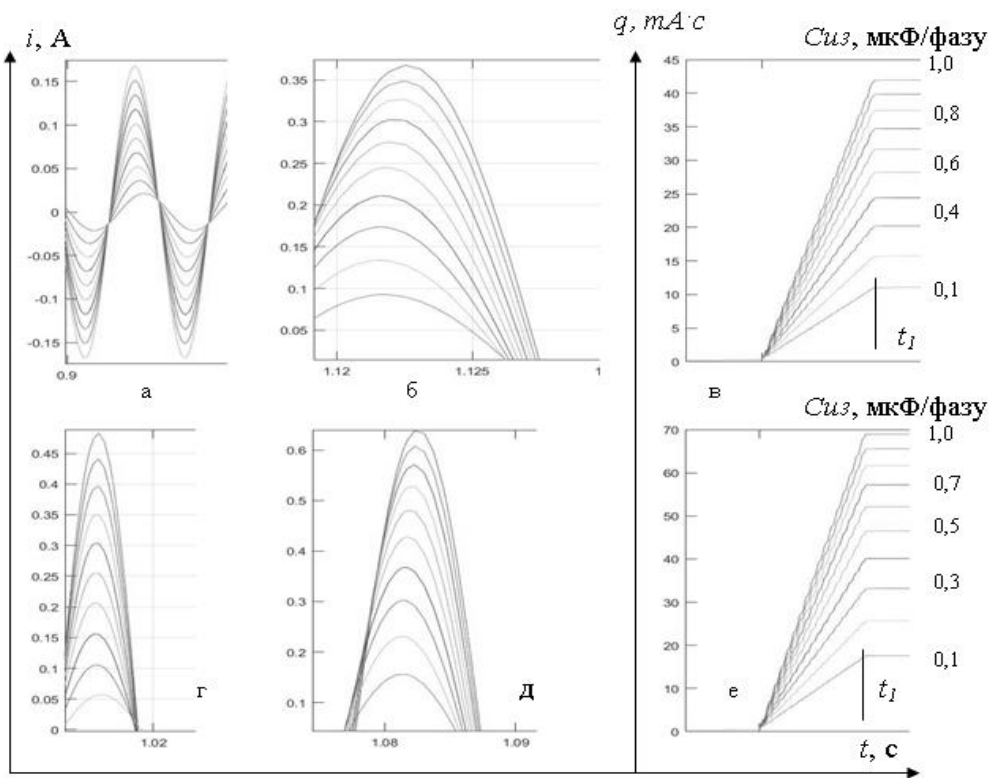


Рисунок 1.5 – Осциллограммы токов (а, б, г, д) и диаграммы количества электричества (в, е) в цепи утечки тока на землю ($R_{ум} = 1$ кОм) в зависимости от ёмкости изоляции сети в диапазоне от $C_{из} = 0,1$ мкФ/фазу (нижние кривые) до $1,0$ мкФ/фазу (верхние кривые) с шагом в $\Delta C = 0,1$ мкФ/фазу: а, б, в – линейное напряжение сети – 660 В; г, д, е – линейное напряжением сети – 1140 В; а, г – синусоиды тока в цепи изоляции между фазой и землёй; б, д – синусоиды тока в цепи утечки тока на землю

Несмотря на режим изолированной нейтрали трансформатора, это априори формирует фактор опасности электропоражения человека в случае его контакта с землёй и фазным проводником, находящимся под напряжением. В этом случае функции защиты человека от электропоражения сводятся не к устранению электропоражающего фактора, а к ограничению количества электричества в теле человека в условиях постоянно действующего электропоражающего фактора, созданного вследствие заземления центральных проводов гибких кабелей.

Переход токов в цепь утечки на землю исследованиями [14, 15] определён как основной недостаток и действующей в отрасли системы высоковольтного электроснабжения (СВЭ) шахт, поскольку:

- токи утечки достаточны для электропоражения людей;
- ёмкость «силовая жила – жила заземления» обладает накопленной энергией, опасной для воспламенения метановоздушной смеси;
- распределительная высоковольтная сеть электроснабжения является протяжённой и непрерывной, что делает её искроопасной в совокупности с устройством предварительного контроля сопротивления изоляции;
- цепи общешахтной сети заземления, в которую попадают токи утечки, на землю являются искроопасными, что недопустимо и не согласуется с требованиями действующих нормативных документов – ГОСТ 30852.10-2002; ГОСТ Р МЭК 60079-11-2010 [16; 17].

В связи с этим, основой разрабатываемой новой стратегии электро- и взрывобезопасности [18] является применение технических средств, исключающих пути токов утечки на заземляющие жилы кабелей и сеть местного заземления. В качестве приемлемого решения предлагается применение высоковольтного кабеля, в котором ЦП, охватываемый по всей длине экранами изоляции фазных проводов, выполняет функцию не заземляющей, а экранной жилы, изолированной от заземления и корпусов электрооборудования.

Новая стратегия электро- и взрывобезопасности предполагает также применение информационно-диагностической системы непрерывного контроля технического состояния электрооборудования, комплексное применение

автоматических защит, чувствительных к распознаванию возникающих повреждений в шахтных электросетях.

Из анализа проблемных вопросов, относящихся к обеспечению электробезопасности шахтных высоковольтных электросетей в исследовании [14, с. 5-13] делается вывод, что применение жилы заземления в кабеле и построение на её основе общешахтной сети заземления ухудшает безопасные характеристики СВЭ и одновременно показывает насколько недопустимо в контексте обеспечения электробезопасности использование в распределительной сети и структуре кабеля жилы заземления. В то же время отсутствие жилы заземления исключает формирование ёмкостных токов утечки на землю и необходимость её компенсации, что позволяет устранить недостатки, присущие традиционным СВЭ и кардинально улучшить условия безопасности в шахтах. В данном исследовании приводится предлагаемая схема безопасной СВЭ шахты (Рисунок 1.6), в которой, помимо отделения от заземления ЦП высоковольтных кабелей, реализован способ локализации активной составляющей токов утечки, основанный на гальваническом разделении трёхфазной сети электроснабжения и общешахтной сети заземления, чем устраняется их взаимное влияние в процессе работы. Однако, принятые технические решения относятся только к структуре системы высоковольтного электроснабжения и не распространяются на низковольтные шахтные участковые электрические сети, где проводимости изоляции кабелей с фаз на землю играют аналогичную деструктивную роль, и обязательность заземления металлических корпусов АД с использованием ЦП кабелей электропитания как средство защиты человека от электропоражения обуславливает формирование постоянно действующего электропоражающего фактора – ёмкостной проводимости изоляции сети.

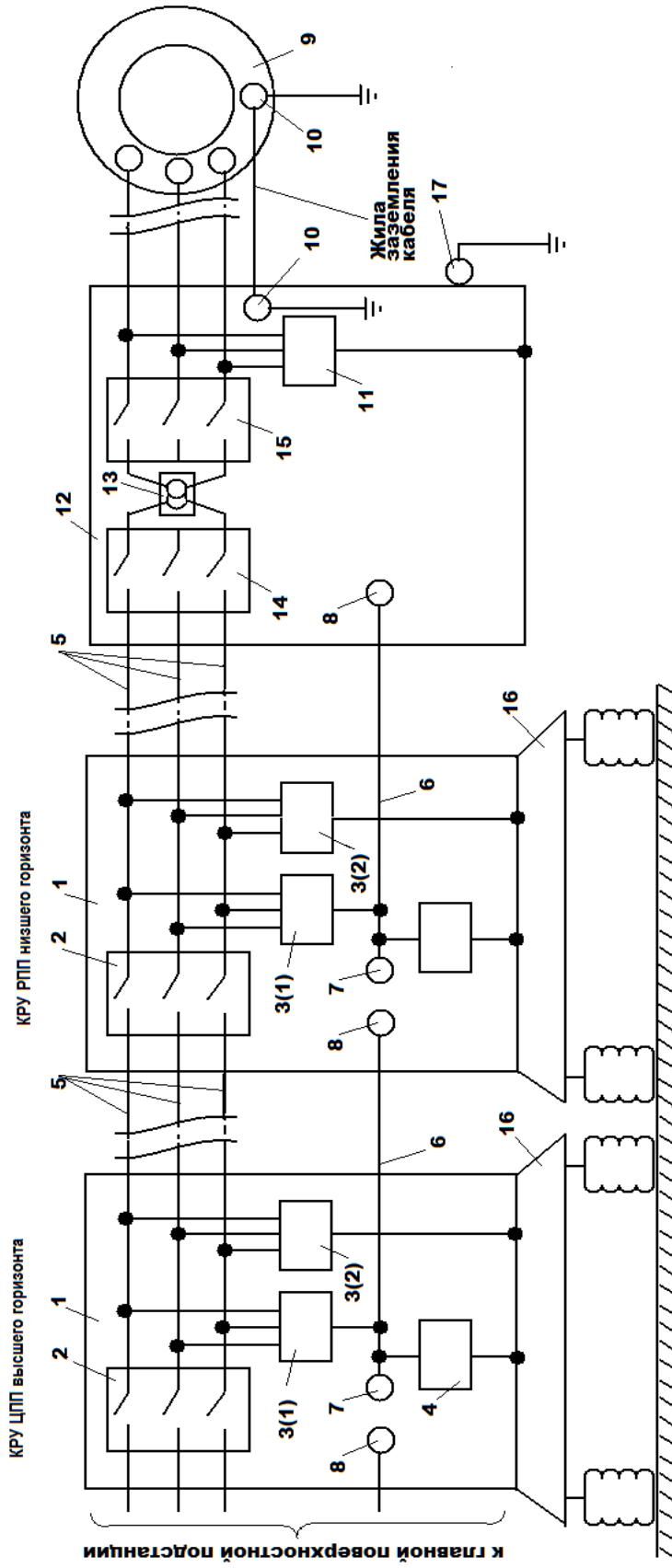


Рисунок 1.6 – Безопасная схема высоковольтного электроснабжения без жилы заземления с традиционной защитой от токов утечки на землю в сети низкого напряжения: 1 – высоковольтное комплектное распределительное устройство; 2 – коммутационный аппарат; 3 – устройство защиты от токов утечки; 3(1) – на экранную жилу (6); 3(2) – на корпус; 4 – устройство замыкания «экранная жила – корпус»; 5 – высоковольтный кабель; 7, 8 – изоляторы; 9 – низковольтный АД; 10 – внутренний заземляющий зажим; 11 – аппарат защиты от токов утечки на землю (АЗУР); 12 – КТП; 13 – силовой трансформатор; 14 – разъединитель отсека РУВН КТП; 15 – АВ отсека РУНН КТП; 16 – условное изображение изоляции корпуса КРУ, указывающего на отсутствие контакта его оболочки с «землей» выработки; 17 – наружный заземляющий зажим

В свете изложенного следует отметить, что подключение к заземлению ЦП охваченного по всей длине кабеля экранами изоляции силовых фазных проводов, делает электрическую сеть, функционирующую в режиме изолированной от земли нейтрали трансформатора, гальванически связанной пофазно с сетью заземления и уточнить, что помимо ёмкостных проводимостей, образуемых фазными и ЦП кабеля формируются ёмкостные проводимости, образуемые изоляцией между фазными проводами и его оболочкой (Рисунок 1.7). Поэтому отделение ЦП кабеля от заземления существенно в области повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети, хотя и решает проблему подавления электропоражающего фактора лишь частично.

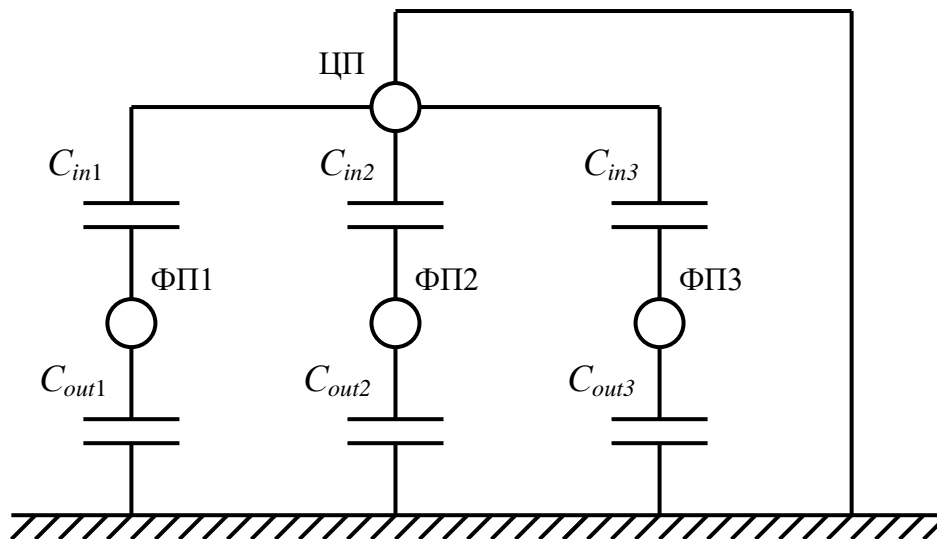


Рисунок 1.7 – Схема распределения ёмкости изоляции шахтного гибкого экранированного кабеля между фазными проводами (ФП) и землёй при присоединении к заземлению центрального провода (ЦП)

Присоединением ЦП к заземлению параллельно подключаются (в каждой фазе) частичные ёмкости, образуемые между фазным и центральным проводами (C_{in}) и частичные ёмкости (C_{out}), образуемые между фазным проводом и поверхностью внешней оболочки кабеля: $C_{uz} = C_{in} + C_{out}$. Исследованиями [19] установлены эмпирические зависимости величин этих частичных ёмкостей от физических и геометрических параметров шахтного гибкого кабеля:

$$C_{out} = 2\pi\epsilon_0 l / \ln(1,68R / r_{\phi n}) , \quad (1.11)$$

$$C_{in} = 2\pi\epsilon_0 l / \ln(0,98R^2 / r_{\phi n} r_{\psi n}) , \quad (1.12)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха (пф/м); l - длина кабеля (м); R - внешний радиус оболочки кабеля (мм); $r_{\phi n}$, $r_{\psi n}$ - соответственно, радиусы фазного и центрального проводов кабеля.

Данные зависимости позволяют установить, какую долю в ёмкости изоляции кабеля (между фазой и землёй) составляет частичная ёмкость, образуемая между фазным и центральным проводами: $\vartheta_c = 100 \cdot C_{in} / C_{из}$, %. Результаты расчётов, выполненных применительно к кабелям марки КГЭШ [20], сведены в таблицу 1.1, где $J_1 = \ln(1,68R / r_{\phi n})$; $J_2 = \ln(0,98 R^2 / r_{\phi n} r_{\psi n})$.

Таблица 1.1 – Данные расчёта удельного веса ёмкости, образуемой между фазным и центральным проводами, в ёмкости изоляции кабелей марки КГЭШ

№ п/п	Площадь сечения, мм ²		Радиус, мм			J_1	J_2	ϑ_c , %	J_1 / J_2
	ФП	ЦП	R	$r_{\phi n}$	$r_{\psi n}$				
1	4	2,5	14.1	1,12	0,892	3,05	5,27	36,6	0,578
2	6	4	15.05	1,38	1.120	2,91	4,97	36,9	0,585
3	10	6	17,00	1,78	1.380	2,78	4,74	36,9	0,586
4	16	10	18.85	2,26	1,780	2,64	4,46	37,2	0,591
5	25	10	20,10	2,82	1,780	2,48	4,37	36,2	0,567
6	35	10	22.25	3,34	1,780	2,41	4,40	35,3	0,548
7	50	10	24,05	3,98	1,780	2,31	4,02	36,5	0,574
8	70	10	26,05	4,72	1,780	2,23	4,39	33,7	0,508
9	95	10	28.15	5,50	1,780	2,15	4,37	33,0	0,492
10	120	16	31,55	6,18	2,260	2,15	4,25	33,6	0,506

Среднее значение параметра ϑ_c составляет: $\vartheta_{c \text{ ср}} = 35,6$ %. Таким образом, результатом заземления металлических корпусов асинхронных двигателей

электропотребителей участка шахты методом присоединения их к элементам сети заземления посредством ЦП кабелей электропитания является увеличение более чем на 50% ёмкости $C_{из}$, а следовательно, и ёмкостной проводимости $b_{из} = 2 \pi f C_{из}$ изоляции между фазами сети и землёй, что ведёт к росту тока в цепи однофазной утечки на землю и, следовательно, к увеличению параметров фактора электропоражения человека при его касании к фазному проводнику сети.

1.2 Ёмкость изоляции электрической сети участка шахты как фактор формирования тока в цепи заземления

Очевидным результатом появления цепи однофазной утечки тока на землю является смещение потенциала нейтрали, распределение потенциалов между заземлителями и формирование токов в распределённых территориально ответвлениях системы заземления электрической сети участка шахты. Величины этих токов могут не удовлетворять критериям искробезопасности [16, 17], что предопределяет актуальность соответствующего исследования [21, с. 20-26]. Вследствие нарушения симметрии сети (Рисунок 1.8) происходит смещение напряжения нейтрали, и напряжения фаз принимают значения:

$$\Delta \dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_N \quad , \quad (1.13)$$

$$\Delta \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N \quad , \quad (1.14)$$

$$\Delta \dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_N \quad , \quad (1.15)$$

где $\dot{U}'_A; \dot{U}'_B; \dot{U}'_C$ - векторы фазных напряжений сети; \dot{U}_N - вектор напряжения смещения нейтрали сети при несимметрии нагрузки:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_{A-3} + \dot{U}_B Y_{B-3} + \dot{U}_C Y_{C-3}}{Y_{A-3} + Y_{B-3} + Y_{C-3}}, \quad (1.16)$$

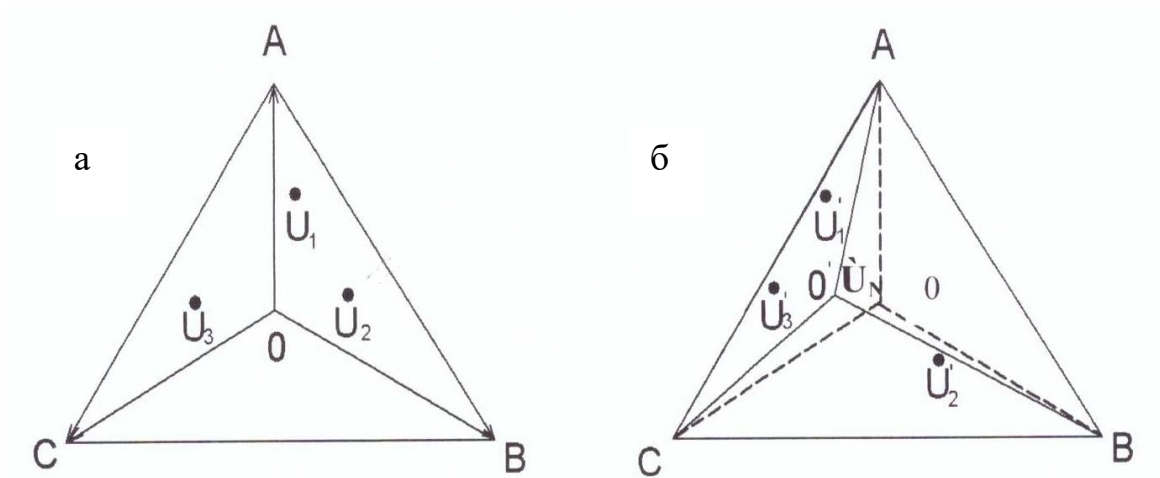


Рисунок 1.8 – Векторная диаграмма напряжений трёхфазной электрической сети: а - при симметричном сопротивлении изоляции; б - при прикосновении человека к одной из фаз сети

Эти соотношения позволяют определить:

– ток, протекающий через человека (через сопротивление утечки):

$$I_{ym} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{R_{ym}}, \quad (1.17)$$

– ток через комплексное сопротивление ($Z = 1/Y$) изоляции 1-й (А), 2-й (В), 3-й (С) фаз:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{Z_{A-3}}, \quad (1.18)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{Z_{B-3}}, \quad (1.19)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{Z_{C-3}}, \quad (1.20)$$

Применительно к структуре системы заземления участка шахты токи, представленные выражениями (1.18-1.20), определяют формирование соответствующих составляющих тока утечки на землю, распределённых в её ветвях проводимости.

Допустим, что технологический комплекс участка шахты представлен электропотребителями (Таблица 1.2), каждый из которых подключен к трёхфазной сети линейного напряжения 1140 В промышленной частоты 50 Гц посредством одного шахтного экранированного гибкого кабеля. Пренебрегаем параметрами магистрального кабеля, связывающего выход трансформатора (TV1) КТП со входом схемы соединения гибких кабелей в связи с малой протяжённостью последнего. Активные ($R_{из}$) и ёмкостные ($X_{из}$) сопротивления изоляции каждого кабеля (между фазами и землёй) на расчётной схеме объекта исследования представлены сосредоточенными комплексными величинами Z_i (Рисунок 1.9). Введём допущения:

- ёмкостные сопротивления изоляции каждой фазы кабеля равны между собой, определяются его структурой, сечением и протяжённостью, и соответствуют параметрам, приведенным в таблице 1.2;

- активные сопротивления изоляции кабелей зависят от их технического состояния. Принимаем, что активные сопротивления изоляции каждой фазы каждого кабеля равны между собой. Рассматриваем два варианта: $R_{из} = 0,5 \text{ мОм} / \text{фазу}$; $R_{из} = 1,0 \text{ мОм/фазу}$;

- активными сопротивлениями элементов заземляющей сети пренебрегаем ввиду их предельно малых величин;

- прикосновение к фазе сети человека, имеющего контакт с землёй, имитируется замыканием контакта К1 (Рисунок 1.9), соединяющим цепь утечки ($R_{ут}$) на землю;

- с учётом возможных различий физических состояний человека, принимаем величину его сопротивления в фиксированных значениях: $R_{ут} = 1,0 \text{ кОм}$; $R_{ут} = 0,8 \text{ кОм}$; $R_{ут} = 1,2 \text{ кОм}$;

– вычисление величин токов в заземляющей сети производим в её ветвях в местах подключения амперметров (PA_i) методом компьютерного моделирования [22] с учётом стационарности процесса, синусоидальности, периодичности, симметрии в фазах и полуволнах токов сети.

Результаты моделирования сведены в таблицу 1.3. Для сравнения в колонке 3 данной таблицы приведены величины токов в ветвях сети заземления участка шахты при $R_{ут} = 1,0$ кОм, величинах активного сопротивления изоляции каждого фазного проводника каждого кабеля $R_{из} = 0,5$ МОм при полной компенсации ёмкости изоляции ($C_{из} = 0$ мкФ/фазу; $X_{из} = \infty$).

Таблица 1.2 – Параметры кабельных присоединений (кабели КГЭШ) расчётной схемы электротехнического комплекса участка шахты

Наименование электропотребителя	Сечение силовой жилы кабеля s , мм ²	Удельная ёмкость изоляции $C_{из}$ уд, (мкФ/фазу) /км	Длина кабеля l , км	Ёмкость изоляции кабеля, $C_{из}$, мкФ/фазу
Комбайн очистной	70	0,870	0,35	0,3045
Конвейер лавы	50	0,670	0,35	0,2345
Конвейер штрека	50	0,670	0,10	0,0670
Маслостанция №1	35	0,520	0,05	0,0260
Маслостанция № 2	25	0,424	0,05	0,0212
Станция орошения	16	0,363	0,05	0,0182

Из приведенных результатов следует, что в случае однофазной утечки на землю ($R_{ум} = 1$ кОм) следует вероятность появления тока в элементах заземления, находящегося в зависимости от величины ёмкости изоляции сети. Этот ток может достигать значений, превышающих предельно допустимые уровни искробезопасного тока. Поскольку одна из защитных функций АЗ в шахтной участковой электрической сети состоит в закорачивании повреждённой фазы на землю через резистор малого сопротивления ($R = 100$ Ом = $0,1 R_{ум}$), это предопределяет ещё бóльший рост тока в цепях заземления (Таблица 1.4). Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что:

- активные сопротивления изоляции фазных проводников шахтных силовых гибких кабелей, соответствующие по величине техническим условиям их эксплуатации, не оказывают существенного влияния на величину токов в ветвях проводимостей участковой системы заземления;

- существенное влияние на величину токов в ветвях системы заземления участка шахты при возникновении однофазной утечки тока на землю оказывают ёмкости изоляции кабелей, образуемые между фазными проводниками и землёй;

- защитное закорачивание на землю повреждённой фазы создаёт ток в цепи заземления, способный вызвать искрение в её присоединениях.

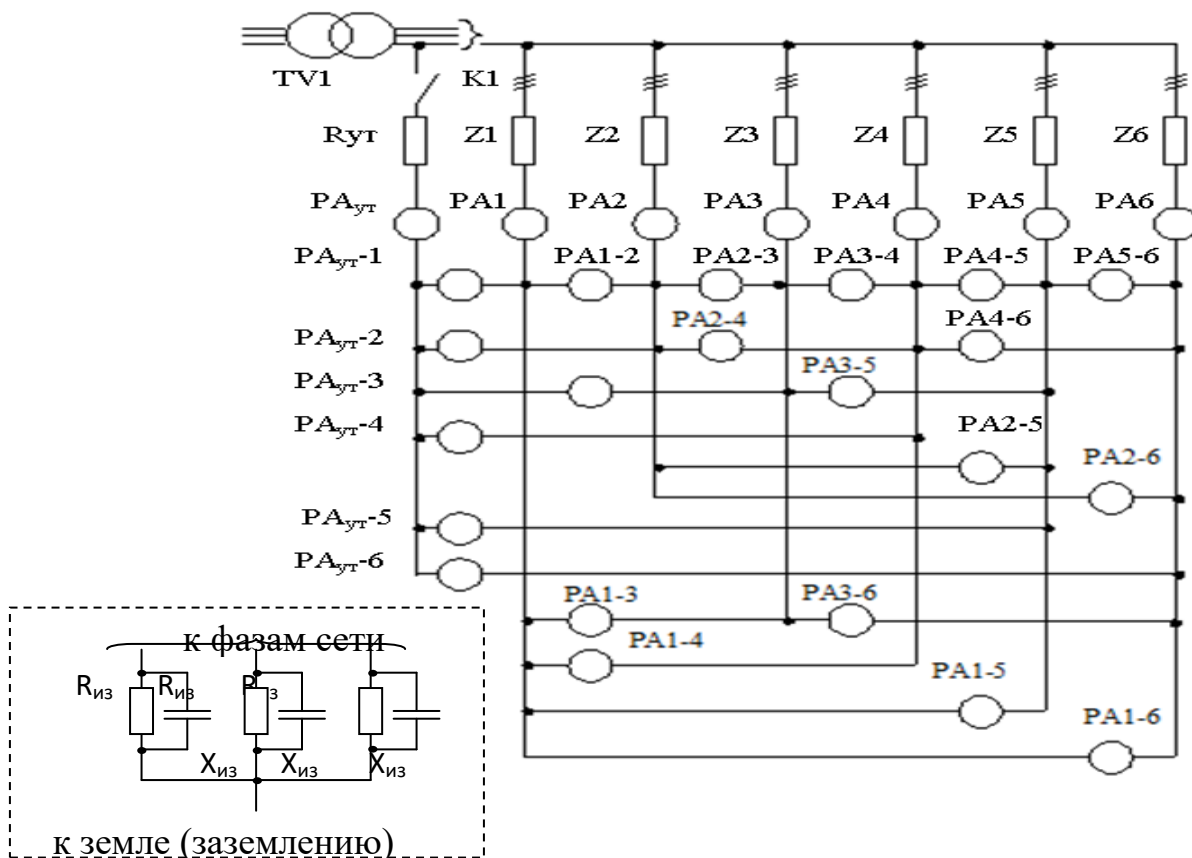


Рисунок 1.9 – Расчётная схема измерения токов в распределённых ветвях заземляющей сети участка шахты и структура комплексного сопротивления изоляции кабельного присоединения Z_i расчётной схемы

Электропитание потребителей высокой мощности предполагает применение кабелей, отличающихся высоким уровнем ёмкости изоляции, что, в свою очередь, предопределяет увеличение токов в ветвях проводимости системы заземления (проходящих между точками заземления электропотребителей). Величины токов

в ветвях проводимости, прилегающих к точкам заземления электрооборудования высокой мощности, могут превышать предельно допустимые значения, отвечающие критериям искробезопасности, в соответствии с которыми допустимые уровни энергии в искробезопасной электрической цепи не должны превышать 180 мкДж, что соответствует максимальному напряжению разомкнутой электрической цепи 36 В, значению тока короткого замыкания 120 мА, допустимой мощности 0,45 Вт.

Таким образом, совпадение по времени наличия цепи утечки тока на землю с состоянием нарушения контакта в элементах цепи заземления может спровоцировать искрение, что представляет собой потенциальную опасность взрыва метано-воздушной смеси в шахтной атмосфере. Формирование токов в цепи заземления, обусловленных проводимостями изоляции и превышающих искробезопасные параметры, подтверждается моделированием (Рисунок 1.10) [23].

Следовательно, обязательное присоединение ЦП гибких кабелей к заземлениям, создавая ёмкостные проводимости изоляции, априори обуславливает формирование токов в заземляющей сети участка шахты, превышающих воспламеняющие токи, определяемые ГОСТ 30852.10-2002; ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010, что применительно к горному предприятию представляет собой опасность взрыва метано-воздушной смеси.

Таблица 1.3 – Результаты вычисления токов в ветвях сети заземления (по рисунку 1.9) при возникновении цепи утечки ($R_{ут}$) тока на землю

№ п/п	Обозначение амперметра	Показания амперметров, мА при $U_{л} = 1140$ В;						
		$C_{из} = 0$ мкФ/фазу ($X_{из} = \infty$) $R_{из} = 0,5$ мОм/фазу $R_{ут} = 1,0$ кОм	$C_{из} \gg 0$ мкФ/фазу (соответствует Таблице 1.2)					
			$R_{из} = 0,5$ мОм /фазу			$R_{из} = 1,0$ мОм/фазу		
			$R_{ут}$ (кОм):			$R_{ут}$ (кОм):		
		0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	РА _{ут}	22,93	368,60	347,9	327,00	372,40	351,90	331,00
2	РА1	3,822	167,00	157,60	148,10	168,80	159,50	150,10

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	РА2	3,822	128,60	121,40	114,10	130,0	122,91	115,60
4	РА3	3,822	36,89	34,81	32,72	37,19	35,14	33,05
5	РА4	3,822	14,66	13,84	13,01	14,52	13,72	12,91
6	РА5	3,822	12,12	11,44	10,75	11,88	11,23	10,56
7	РА6	3,822	10,56	9,96	9,361	10,24	9,675	9,101
8	РА _{УТ} -1	3,822	76,50	72,19	67,86	77,32	73,06	68,72
9	РА _{УТ} -2	3,822	71,03	67,03	63,00	71,78	67,82	63,80
10	РА _{УТ} -3	3,822	57,93	54,66	51,38	58,52	55,29	52,01
11	РА _{УТ} -4	3,822	16,33	51,64	48,54	55,27	52,22	49,12
12	РА _{УТ} -5	3,822	54,35	51,29	48,20	54,89	51,86	48,78
13	РА _{УТ} -6	3,822	54,11	51,07	48,00	54,65	51,64	48,57
14	РА1-2	0	5,482	5,173	4,862	5,545	5,239	4,928
15	РА1-3	0	18,60	17,55	16,50	18,81	17,77	16,72
16	РА1-4	0	21,81	20,58	19,34	22,06	20,84	19,61
17	РА1-5	0	22,18	20,94	19,68	22,44	21,20	19,95
18	РА1-6	0	22,42	21,16	19,89	22,68	21,43	20,16
19	РА2-3	0	13,12	12,38	11,63	13,27	12,54	11,79
20	РА2-4	0	16,33	15,41	14,48	16,52	15,60	14,68
21	РА2-5	0	16,70	15,76	14,82	16,90	15,96	15,02
22	РА2-6	0	16,94	15,98	15,03	17,13	16,19	15,23
23	РА3-4	0	3,211	3,030	2,848	3,248	3,068	2,886
24	РА3-5	0	3,587	3,385	3,181	3,628	3,428	3,224
25	РА3-6	0	3,821	3,606	3,390	3,865	3,652	3,436
26	РА4-5	0	0,376	0,355	0,333	0,380	0,359	0,338
27	РА4-6	0	0,611	0,576	0,542	0,618	0,584	0,549
28	РА5-6	0	0,235	0,222	0,208	0,238	0,225	0,211

Таблица 1.4 – Результаты вычисления токов в ветвях сети заземления (по рисунку 1.9) при возникновении цепи закорачивания фазы на землю через резистор сопротивления 100 Ом

№ п/п	Обозначение амперметра	Показания амперметров, мА при $U_{л} = 1140$ В; $R_{ут} = 100$ Ом		
		$C_{из} = 0$ мкФ/фазу ($X_{из} = \infty$) $R_{из} = 0,5$ мОм/фазу $R_{ут} = 100$ Ом	$C_{из} \gg 0$ мкФ/фазу (соответствует Таблице 1.2)	
			$R_{из} = 0,5$ мОм/фазу	$R_{из} = 1,0$ мОм/фазу
1	2	3	4	5
1	РА _{УТ}	23,67	421,4	421,7
2	РА1	3,945	190,9	191,2
3	РА2	3,945	147,0	147,2
4	РА3	3,945	42,17	42,11
5	РА4	3,945	16,76	16,44
6	РА5	3,945	13,86	13,46
7	РА6	3,945	12,07	11,60
8	РА _{УТ} -1	3,945	87,46	87,55
9	РА _{УТ} -2	3,945	81,20	81,28
10	РА _{УТ} -3	3,945	66,23	66,26
11	РА _{УТ} -4	3,945	62,56	62,58
12	РА _{УТ} -5	3,945	62,13	62,15
13	РА _{УТ} -6	3,945	61,87	61,88
14	РА1-2	0	6,267	6,278
15	РА1-3	0	21,26	21,30
16	РА1-4	0	18,67	18,70
17	РА1-5	0	25,36	25,41
18	РА1-6	0	25,63	25,68
19	РА2-3	0	15,00	15,02
20	РА2-4	0	18,67	18,70
21	РА2-5	0	19,10	19,13
22	РА2-6	0	19,37	19,40
23	РА3-4	0	3,671	3,677
24	РА3-5	0	4,101	4,108

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
25	РА3-6	0	4,369	4,377
26	РА4-5	0	0,4298	0,4305
27	РА4-6	0	0,6983	0,6996
28	РА5-6	0	0,2686	0,2691

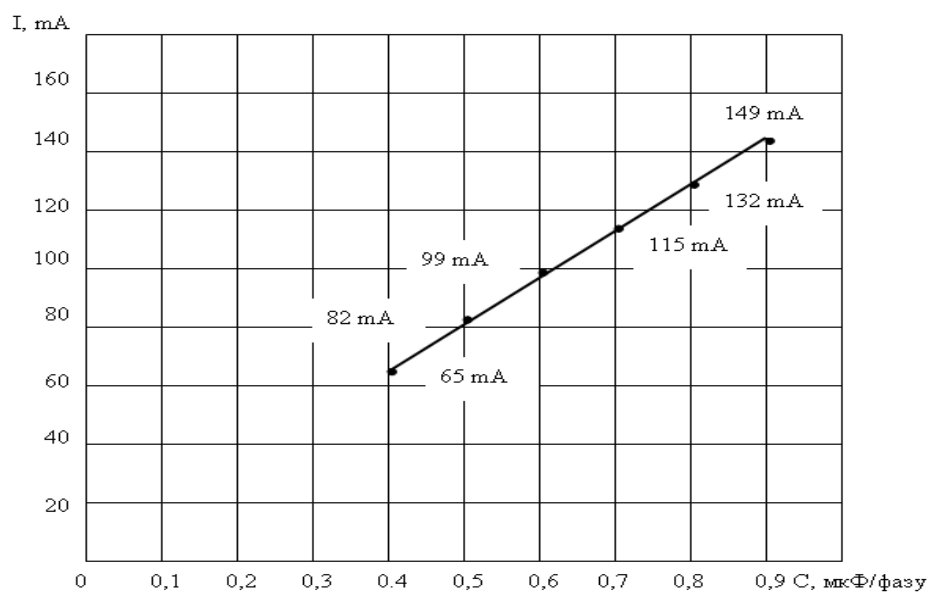


Рисунок 1.10 – Зависимость амплитуд токов в сети заземления от ёмкости изоляции ($C_{из}$, мкФ/фазу) при сопротивлениях: изоляции $R_{из} = 150$ кОм/фазу; цепи заземления $R_3 \approx 0$ Ом; цепи утечки тока на землю $R_{ут} = \infty$; $U_{л} = 1140$ В

1.3 Анализ функциональных возможностей аппаратуры автоматического защитного отключения шахтных участковых электросетей

Обоснованная в [24] и развитая в исследованиях [25, 26, 27] концепция защиты человека от электропоражения при касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением, состоит в создании контура постоянного оперативного тока, подаваемого в электросеть участка, измерения этого тока и сопоставления его с величиной «эталонного», предельно допустимого тока. Эта концепция реализуется вне зависимости от схемных решений аппаратов защиты

от утечек тока на землю [28] – схемами на основе применения: дискретных компонентов (УАКИ, АЗПБ; АЗУР-1; РУ-1140) [29]; интегральных, микросхем (АЗУР-4) [30]; микроконтроллеров (АЗУР-1М; АЗУР-4МК) [31, 32].

Способ, основанный на сопоставлении оперативного и эталонного токов [33], является результатом поиска решения в области противодействия ложным срабатываниям защиты (основанной на последовательном подключении измерительного узла в цепь оперативного тока), вызванным воздействием коммутационных переходных процессов. Тем не менее, ложные срабатывания аппаратуры автоматического защитного отключения (аппараты АЗУР-1, АЗУР-4 и т.п.) возникают в процессе эксплуатации шахтных участков электрических сетей. Условия, способствующие ложным срабатываниям, установлены в исследовании [34] и касаются параметров активного сопротивления и ёмкости изоляции сети. Так, для сети линейного напряжения 660 В ложные срабатывания указанной аппаратуры возникают при ёмкости изоляции сети $C_{из} > 0,25$ мкФ/фазу и относительно низком её активном сопротивлении $R_{из} \approx 35 \div 40$ кОм. Это предопределяет применение фильтров низкой частоты при измерении оперативного параметра, что замедляет измерительный процесс.

В контексте реализации функции автоматического защитного отключения электросети участка шахты следует учитывать применение в её структуре гибких кабелей, проводящие экраны изоляции силовых жил которых находятся в контакте с заземлёнными центральными проводами. В этом случае возможна реакция аппарата защиты на появление проводимости с фазы на землю вследствие повреждения изоляции кабеля, что иллюстрируется схемой замещения электрической сети участка шахты (Рисунок 1.11). На схеме обозначены: А0 - вторичная обмотка трансформатора КТП; А1 - цепь оперативного тока аппарата АЗУР-1; А2: А5, А8 соответственно, - активно-ёмкостные сопротивления изоляции магистрального кабеля и гибких кабелей силовых присоединений; А3, А6 - коммутационные аппараты силовых присоединений; А4, А7 - активно-индуктивные цепи нагрузки - асинхронных двигателей М1, М2; А9 - сопротивления земли между точками заземления.

В условиях наличия проводимостей между фазами сети и землёй функция средств автоматического защитного отключения сводится не к устранению причины формирования электропоражающего фактора, а к ограничению количества электричества (q) через тело человека до уровня $q \leq 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$, в т.ч., за счёт частичной компенсации ёмкостных токов утечки и ускорения обесточивания электросети (Рисунок 1.12).

Из исследования [35] следует, что «значительное снижение количества электротравм наблюдалось лишь в период широкого внедрения устройств защитного отключения на горных предприятиях (1952 – 1962 г.г.). Совершенствование технических средств обеспечения условий электробезопасности в последующие годы не привело к существенному снижению числа электротравм и выполняло компенсирующую роль, не допуская роста несчастных случаев при возрастании уровня электрификации горного производства, роста электровооружённости труда». При этом полное исключение электротравматизма не достигнуто. Так, распределение электротравм персонала на шахтах Украины (подземные работы), в среднем, составляет 15% (сети напряжения $> 1000 \text{ В}$) к 85% (сети напряжения $\leq 1000 \text{ В}$). По состоянию, например, на 2012 г. общий показатель электротравматизма – 61 случай, а смертельный электротравматизм - 12 случаев.

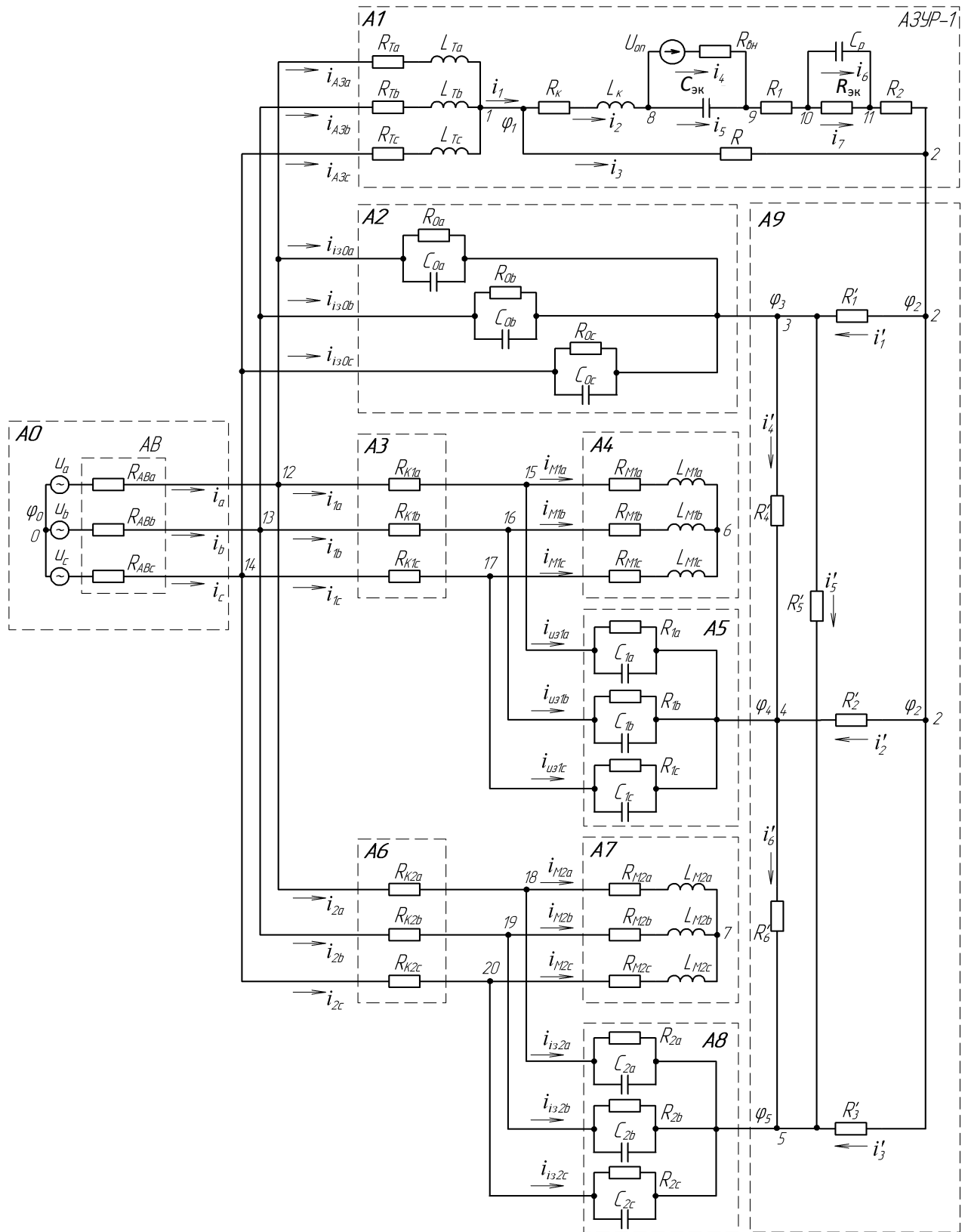


Рисунок 1.11 – Схема замещения шахтной участковой электрической сети с аппаратом защиты от утечек тока на землю АЗУР-1, где $C_{ЭК}$ – эквивалентная ёмкость, $R_{ЭК}$ – эквивалентное сопротивление

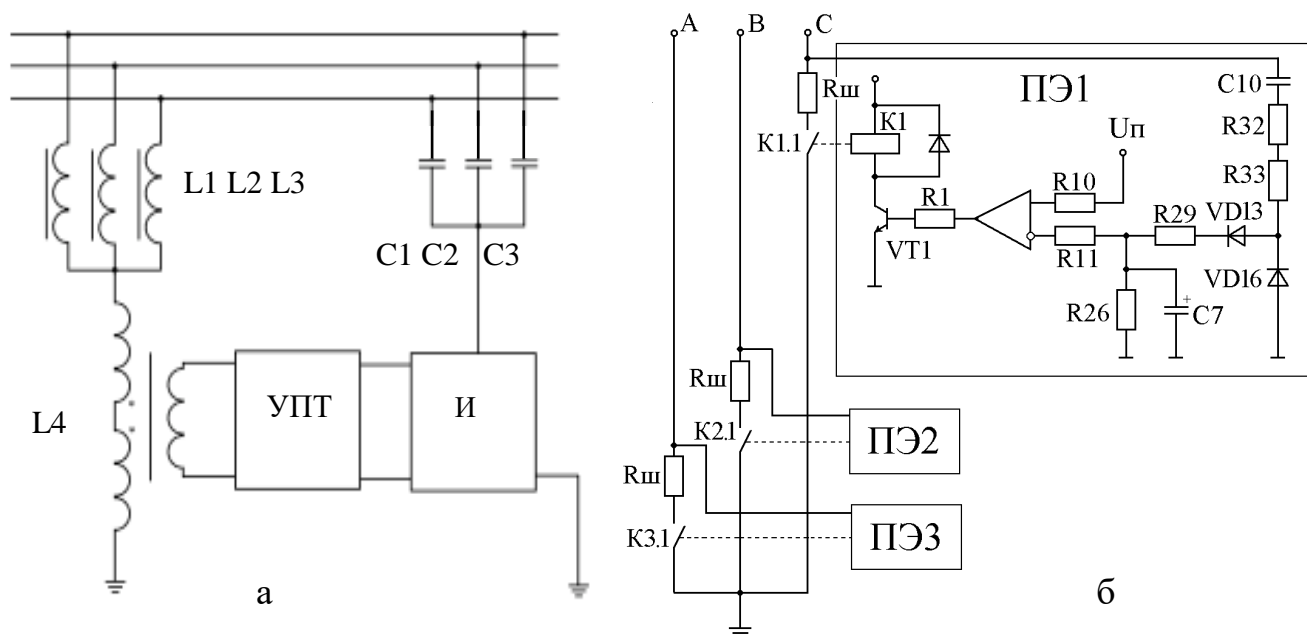


Рисунок 1.12 – Схемы реализации функций автоматической компенсации ёмкости изоляции сети (а) и выявления и замыкания на землю повреждённой фазы сети (б): УПТ - усилитель постоянного тока; УИ - измеритель ёмкости изоляции сети; ПЭ - пороговый элемент; $R_{ш}$ - шунтирующий резистор сопротивлением 100 Ом

Структура возникновения травмоопасных факторов в системе «человек – горнорудное производство – электротехнические комплексы» обоснована в исследовании [36], из которого следует вывод о наличии совокупности факторов, приводящих к электротравмам персонала шахты, проявляемых в различных комбинациях. В таких условиях критериям актуальности отвечает анализ функциональных возможностей аппаратуры автоматического защитного отключения шахтных участковых электросетей.

1.3.1 Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю

Исследованием [37] обоснована целесообразность автоматической компенсации ёмкостной составляющей тока утечки на землю как средства повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети. Схемные решения автоматических компенсаторов (АК) ёмкости изоляции сети, представленные в работах [38, 39, 40, 41, 42], раскрывают общую концепцию,

согласно которой процесс автоматической компенсации состоит в измерении ёмкости изоляции сети, формировании постоянного тока, пропорционального измеренному параметру ёмкости, и использовании этого тока в качестве параметра управления компенсирующим дросселем аппарата защиты от утечек тока на землю. Процессы в шахтных участковых электрических сетях низкого напряжения при подключении индуктивных компенсирующих элементов представлены математическими зависимостями электрических параметров, подтверждающими эффект снижения ёмкостной составляющей тока в цепи утечки на землю вследствие параллельного присоединения индуктивности. Однако практическую актуальность представляют вопросы, относящиеся к установлению количественных показателей, характеризующих функциональные возможности автокомпенсатора ёмкости изоляции шахтной участковой электрической сети в контексте ограничения электропоражающего фактора, в т.ч., в условиях ступенчатого изменения ёмкости изоляции сети. Эта проблематика может быть раскрыта на основе исследования автокомпенсатора ёмкостных токов утечки, функционирующего в структуре применяющегося в промышленности, аппарата защиты от утечек тока на землю. Расчётная схема АК с регулируемым дросселем L1 в структуре аппарата защиты АЗУР-1 [6, с. 356-359, с. 372-375] приведена на рисунке 1.13.

На схеме введены обозначения: TV1 – силовой трансформатор КТП, L1-L3 – фильтр присоединения цепи дросселя автокомпенсатора к фазам сети, VC1 – выпрямитель источника оперативного тока, VC2 – трёхфазный мостовой выпрямитель. Поскольку в аппарате АЗУР-1 выходным каскадом автокомпенсатора является транзистор, включенный последовательно с управляющей обмоткой компенсирующего дросселя, эта функция в расчётной схеме представлена цепью резисторов R1- R2, один из которых (R1) может шунтироваться контактом K1.1 при ступенчатом подключении импедансов ($Z_{из2}$) изоляции (контактом K1.2), что имитирует эффект подключения/отключения кабеля.

Коммутацией сопротивления утечки $R_{ут}$ (контактом K1.3), может быть

установлен характер влияния процесса перенастройки автокомпенсатора аппарата АЗУР-1 на величину электрических параметров, воздействующих на сопротивление человека (цепи утечки R_{ym} тока на землю) в том числе, в условиях ступенчатого присоединения/отсоединения кабеля с высокими уровнями ёмкости изоляции относительно земли. Функциональные возможности средства автокомпенсации исследованы экспериментально на стенде (Рисунок 1.14, Рисунок 1.15) [43].

Схема стенда имитирует трёхфазную электрическую сеть линейного напряжения 380 В в режиме изолированной нейтрали трансформатора. В структуру стенда входит аппарат защиты от утечек тока на землю типа АЗУР-1, содержащий автокомпенсатор ёмкости изоляции сети; постоянные в каждой фазе присоединения ёмкости изоляции сети $C_{из} = 0,25$ мкФ/фазу и активные сопротивления изоляции $R_{из} = 150$ кОм/ фазу. Параллельно конденсаторам $C_{из}$ автоматическим выключателем SA1 и перемычками К1 – К3 коммутируются дополнительные ёмкости изоляции сети относительно земли ($C_{из1} - C_{из3}$, в общем случае $C_{из доп.}$) в диапазоне $0,1 \div 0,5$ мкФ/фазу с шагом в 0,1 мкФ/фазу.

Имитация активных проводимостей изоляции сопротивлениями значительной величины ($R_{из} \geq 150$ кОм/фазу) позволяет пренебречь влиянием параметра $R_{из}$ на величину тока утечки на землю и рассматривать в качестве основных факторов влияния ёмкостные проводимости изоляции ($B_{из} = 2\pi f C_{из}$), а также уровень их компенсации функциональными узлами аппарата АЗУР-1.

Цепь утечки тока на землю имитируется резистором $R_{ут}$, подключаемым между фазой сети и землёй. Снимаемое с резистора падение напряжения ΔU поступает на вход осциллографа, что позволяет фиксировать специфику изменения электрического параметра в цепи $R_{ут}$, и вычислять величину тока в указанной цепи активного сопротивления:

$$I_{ym} = \Delta U / R_{ym} \quad , \quad (1.21)$$

отключения от сети с ёмкостью изоляции 0,25 мкФ/фазу трёхфазных присоединений с фиксированными ёмкостями изоляции в диапазоне от 0,1 мкФ/фазу до 0,5 мкФ/фазу с шагом 0,1 мкФ/фазу;

– установление уровня недокомпенсации ёмкостного тока в цепи утечки на землю сопоставлением уровня падения напряжения на сопротивлении утечки ($R_{ут} = 1000 \text{ Ом}$) при включенном/отключенном автокомпенсаторе аппарата защиты АЗУР-1и ёмкости изоляции в диапазоне от 0,25 мкФ/фазу до 0,75 мкФ/фазу с шагом 0,1 мкФ/фазу.

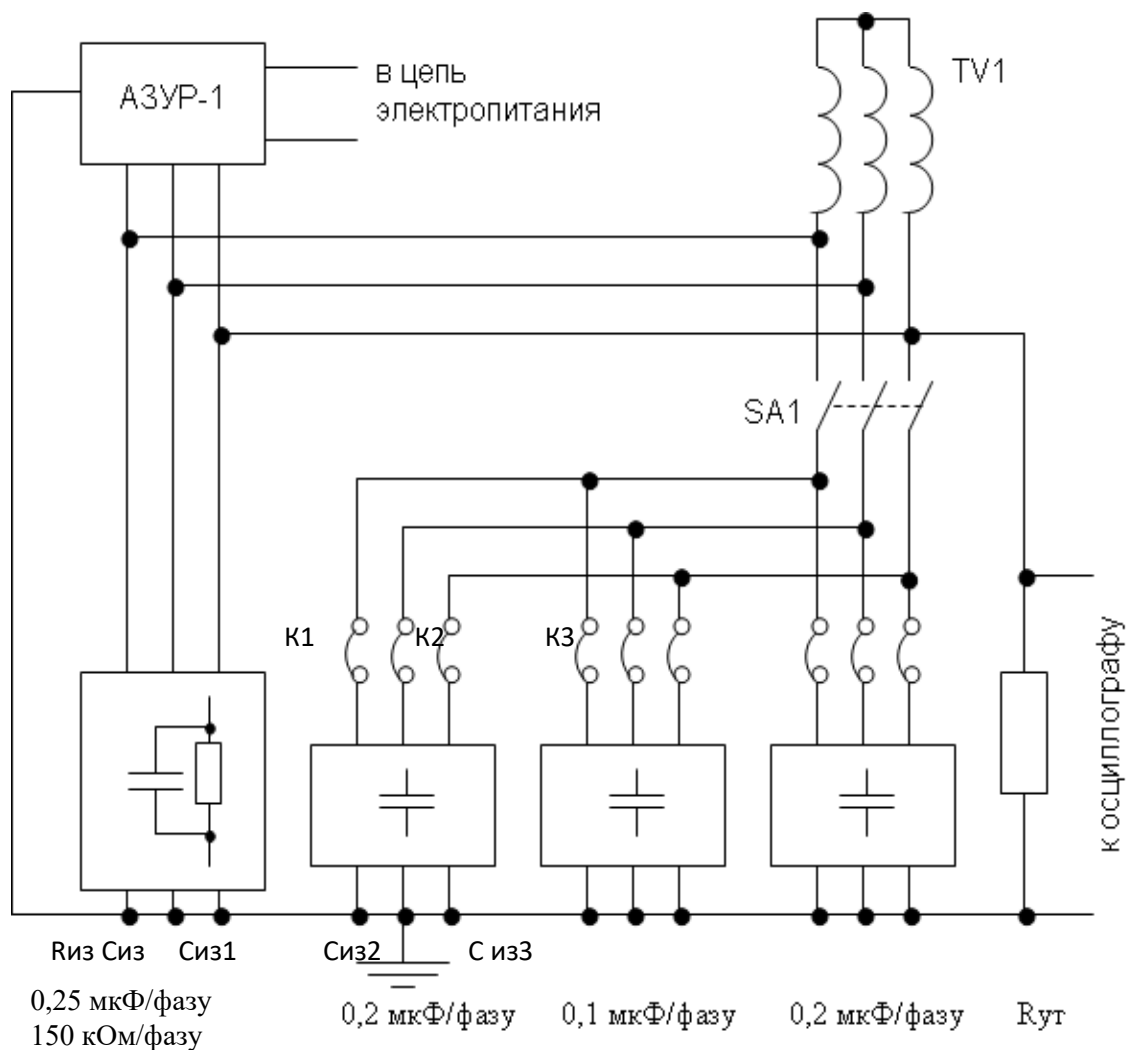


Рисунок 1.14 – Схема стенда для исследования функциональных свойств автокомпенсатора ёмкостных токов утечки на землю аппарата АЗУР-1



Рисунок 1.15 – Структурные компоненты стенда для исследования функциональных свойств автокомпенсатора ёмкостных токов утечки на землю:
 а – аппарат защиты от утечек тока на землю АЗУР-1 (содержащий автокомпенсатор ёмкостных токов утечки на землю);
 б - панель с коммутируемыми дополнительными ёмкостями изоляции физической модели электрической сети участка шахты;
 в - магазин сопротивлений для моделирования величины сопротивления утечки тока на землю,
 г - электронный осциллограф для регистрации результатов физического моделирования процессов

Таблица 1.5 – Соотношение параметров $\Delta U_{m \text{ уст}}$ на сопротивлении утечки $R_{ут}$ при отключенном (-АК) и подключенном (+АК) автокомпенсаторе ёмкостного тока

Ёмкость изоляции сети, мкФ/фазу	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
Соотношение: $\Delta U_{m \text{ уст.}-АК} / \Delta U_{m \text{ уст.}+АК}$	2,57	3,39	3,45	2,96	2,70	2,71

Методика исследований принята в соответствии с положениями теории эксперимента [44, 45]. При этом минимальный объём выборки при точности

$n=0,25$ и статистической надёжности $\gamma=0,95$, необходимой для оценки стандартного отклонения, составляет:

$$n = 1 + 0,5 \left(\frac{z_\alpha}{d} \right)^2 = 1 + \left(\frac{1,96}{0,25} \right)^2 \approx 30, \quad (1.22)$$

где z_α - нормируемая нормально распределённая переменная, значение которой для $\alpha = 1 - \gamma = 0,05$ составляет 1,96. В соответствии с зависимостью (1.22) каждый из перечисленных экспериментов проводится 30 раз для получения достоверных результатов [47].

Из полученных результатов следует, что применение автокомпенсатора ёмкостных токов утечки при $0,25 \leq C_{из} \leq 0,75$ (мкФ/фазу) позволяет снизить параметр $\Delta U_{м\ уст.}$ на резисторе $R_{ут}$ и, следовательно, пропорциональный ему ток в цепи $R_{ут}$ более, чем в 2,5 раза, что иллюстрируется осциллограммами (Рисунок 1.16) [43; 47, с. 186-193].

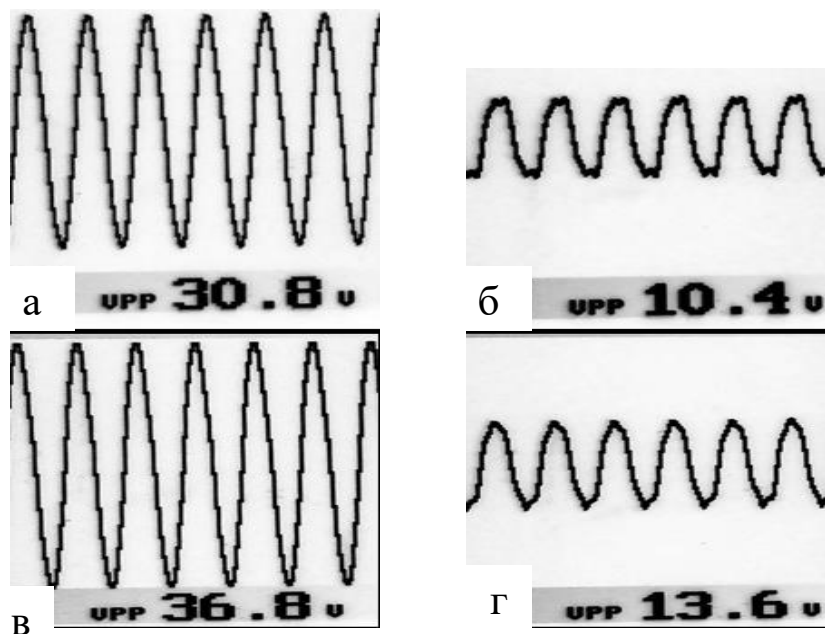


Рисунок 1.16 – Осциллограммы параметра $\Delta U_{м\ уст.}$ на резисторе $R_{ут} = 1$ кОм цепи утечки при отключенном (а, в) и подключенном к сети (б, г) средстве автокомпенсации ёмкости изоляции сети: а, б – ёмкость изоляции $C_{из} = 0,55$ мкФ/фазу; в, г – ёмкость изоляции $C_{из} = 0,75$ мкФ/фазу

Напряжение измерено через делитель 1:10. Поэтому индекс VPP на осциллограммах (полный размах сигнала) представлен в десятках Вольт. Измеренные параметры переходных процессов при подключении/отключении дополнительных ёмкостей изоляции приведены в таблице 1.6, где введены обозначения относительно специфики изменения ΔU_m : «*lift*→*exp*» («*l*→*exp*») - увеличение ΔU_m , переходящее в экспоненциальное снижение до установившегося значения; «*lift*→*osc*» («*l*→*osc*») - увеличение ΔU_m , переходящее в колебания параметра со снижением амплитуды колебаний, прерывающихся в установившееся состояние; «*lift & osc*» («*l & osc*»)- увеличение ΔU_m параметра, сопровождаемое его колебаниями ($f \approx 8,2$ Гц) со снижением амплитуды колебаний, переходящих в установившееся состояние; «*kick* → *exp*» («*k* → *exp*») - бросок ΔU_m , с экспоненциальным снижением до установившегося значения; «*kick* → *osc*» («*k* → *osc*») - бросок ΔU_m с переходом в колебательный процесс. Результаты представлены осциллограммами (Рисунок 1.17) [43, с. 50-60, 48, с. 5-14]. В таблице 1.6 $\Delta U_{m\text{уст}1}$.- амплитуда падения напряжения на $R_{\text{ут}}$ до подключения, либо после отключения дополнительной ёмкости изоляции сети; $\Delta U_{m\text{уст}2}$.- амплитуда падения напряжения на $R_{\text{ут}}$ после подключения дополнительной ёмкости изоляции сети; $\Delta U_{m\text{пп}}$ – максимальное значение падения напряжения на $R_{\text{ут}}$, в течение переходного процесса.

Описанные в таблице 1.6 и представленные на осциллограммах (Рисунок 1.17) переходные процессы обусловлены функцией АК аппарата АЗУР-1, поскольку при неиспользовании этого аппарата ступенчатое изменение ёмкости изоляции сети подобных колебаний параметра ΔU на сопротивлении утечки $R_{\text{ут}}$ не вызывает (Рисунок 1.18). Таким образом, применение средств автокомпенсации ёмкостных составляющих токов утечки на землю в соответствии со схемой аппарата АЗУР-1 позволяет снизить величину тока в цепи утечки ($R_{\text{ут}} = 1$ кОм) не более, чем на 2/3 (от величины тока в цепи утечки на землю при отсутствии эффекта компенсации), что представляет собой неполное подавление ёмкостного тока в цепи утечки на землю.

Из анализа результатов экспериментов [43 с. 50-60, 49, с. 1309] также

следует, что: ступенчатое подключение дополнительной ёмкости изоляции сети, одинаковой в каждой фазе (имитация включения в работу кабельного присоединения), сопровождается кратковременным колебательным переходным процессом изменения величины падения напряжения (ΔU) в цепи утечки тока на землю. Значение установившегося падения напряжения и тока в этой цепи превышает величину этого же параметра, имевшего место до переходного процесса, что также позволяет сделать вывод о неполном эффекте компенсации ёмкости изоляции сети. Увеличение указанного параметра достигает более 50% при подключаемой ёмкости изоляции 0,3 мкФ/фазу и более.

Спецификой проявления переходного процесса, сопровождающего подключение дополнительной ёмкости изоляции сети (наиболее выражено при $R_{ут} = 1$ кОм), является кратковременное (не более 5 периодов напряжения сети) увеличение в 2,24 – 2,36 раза амплитуды падения напряжения (ΔU) на резисторе $R_{ут}$ (и, следовательно, тока в цепи $R_{ут}$ утечки на землю) с последующим выходом на установившееся значение, сопровождаемое на интервале до 0,3 с низкочастотными колебаниями амплитуды этого параметра (Рисунок 1.17 а, в).

В виду кратковременности процесса влиянием этого эффекта на величину количества электричества в цепи утечки тока на землю можно пренебречь. Тенденция к увеличению параметра ΔU на резисторе $R_{ут}$ после подключения дополнительной ёмкости изоляции сети сохраняется вне зависимости от величины первоначально действующей в сети ёмкости изоляции как в случае применения автокомпенсации ёмкости изоляции сети, так и в случае неприменения автокомпенсатора (Таблица 1.7). С повышением величины первоначально действующей в сети ёмкости изоляции увеличивается параметр $\Delta U_{m\text{ уст.}}$. Так, измеренное отношение параметров $\Delta U_{m\text{ уст.}}$ применительно к сетям с $C_{из} = 0,45$ мкФ/фазу и $C_{из} = 0,25$ мкФ/фазу составило: $\Delta U_{m\text{ уст. }45} / \Delta U_{m\text{ уст. }25} \approx 1,4$.

Таблица 1.6 – Параметры переходного процесса изменения падения напряжения ΔU на резисторе $R_{ут}$ сопротивления утечки тока на землю при коммутации дополнительных ёмкостей $C_{из доп.}$ в цепях «фаза-земля» экспериментального стенда

$R_{ут}$, кОм	Ёмкость изоляции сети, $C_{из доп.}$, мкФ/фазу	Превыше- ние ΔU_m на $R_{ут}$ после подключе- ния $C_{из доп.}$			Параметры переходного процесса						
		<10%	<50%	>50%	Подключение $C_{из доп.}$				Отключение $C_{из доп.}$		
					Продолжительность, t_{imp1}	Специфика изменения амплитуды тока в цепи $R_{ут}$	$\Delta U_{m пп}/\Delta U_{m уст1}$	$\Delta U_{m уст2}/\Delta U_{m уст1}$	Продолжительность, t_{imp2}	Специфика изменения амплитуды тока в цепи $R_{ут}$	$\Delta U_{m пп}/\Delta U_{m уст1}$
0,75	0,1	X			0,09	lift →	3,33	1,04	0,04	l→ exp	1,31
	0,2		X		0,10	exp	3,40	1,33	0,07	kick→ exp	3,00
	0,3			X		l→ osc	3,39	1,79	0,08		3,63
	0,4			X	0,11	l & osc	3,50	1,92	0,10		4,50
	0,5			X	0,12	k→ osc	4,37	2,00	0,12		4,92
1,0	0,1	X			0,12	l→ exp	2,34	1,06	0,08		l→ exp
	0,2		X		0,30	lift & osc	2,36	1,43	0,09	kick→ exp	2,10
	0,3			X	0,31		2,55	1,92	0,10		2,19
	0,4			X	0,33		2,24	2,29			2,30
	0,5			X	0,30		2,36	2,38			2,31
10,0	0,1		X		0,12		l→ exp	2,43			1,25
	0,2			X	0,10		2,48	2,45	0,12	kick→ exp	2,14
	0,3						2,17	2,50	0,16		2,22
	0,4			X			2,19	2,51			2,25
	0,5						2,19	2,53			
20,0	0,1		X				0,15	lift & osc			1,4
	0,2			X	0,10	1,8	1,58	kick→ exp	1,68		
	0,3			X	0,09	1,73	1,60		1,64		
	0,4			X		1,73			1,68		
	0,5			X	0,07	1,67			1,68		

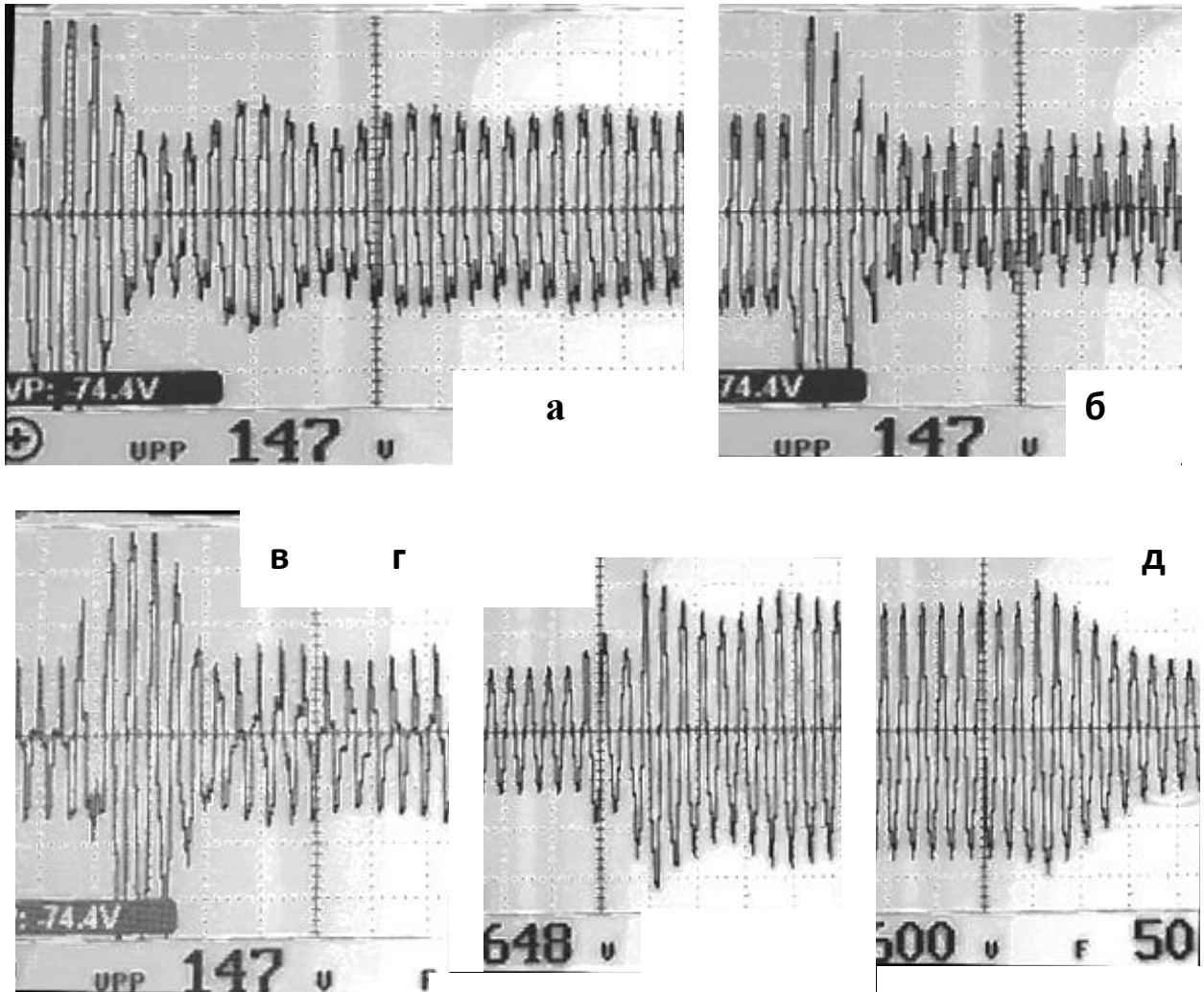


Рисунок 1.17 – Осциллограммы изменения параметра ΔU на резисторе утечки.

- $R_{ут} = 1 \text{ кОм}$: а – ёмкость изоляции сети $C_{из} = 0,25 \text{ мкФ/фазу}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$, подключение дополнительной ёмкости изоляции $C_{из \text{ доп.}} = 0,2 \text{ мкФ/фазу}$;
 б - ёмкость изоляции сети $C_{из} = 0,45 \text{ мкФ/фазу}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$, отключение составляющей ёмкости изоляции $\Delta C_{из} = 0,2 \text{ мкФ/фазу}$;
 в - ёмкость изоляции сети $0,25 \text{ мкФ/фазу}$, $R_{из.} = 1 \text{ МОм}$, подключение дополнительной ёмкости изоляции $C_{из \text{ доп.}} = 0,1 \text{ мкФ/фазу}$.
 $R_{ут} = 10 \text{ кОм}$: г – ёмкость изоляции сети $C_{из} = 0,25 \text{ мкФ//фазу}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$, подключение дополнительной ёмкости изоляции $C_{из \text{ доп.}} = 0,2 \text{ мкФ/фазу}$;
 д - ёмкость изоляции сети $C_{из} = 0,45 \text{ мкФ/фазу}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$, отключение составляющей ёмкости изоляции $\Delta C_{из} = 0,2 \text{ мкФ/фазу}$

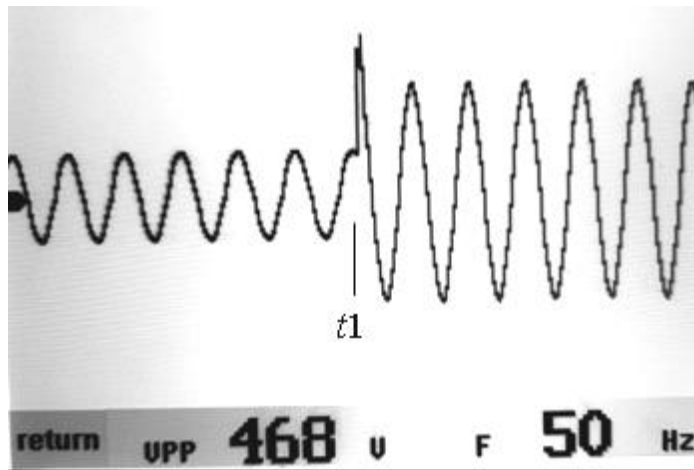


Рисунок 1.18 – Осциллограмма изменения параметра ΔU на сопротивлении утечки $R_{ут}$ при ступенчатом подключении ($t1$) дополнительной ёмкости изоляции сети $C_{из доп.} = 0,5$ мкФ/фазу в случае отключенной от сети схемы автокомпенсатора аппарата защиты от утечек АЗУР-1. Параметры сети: линейное напряжение 380 В, ёмкость изоляции сети (до переходного процесса) $C_{из} = 0,25$ мкФ/фазу, активное сопротивление изоляции $R_{из} = 150$ кОм / фазу

На основании данных эксперимента может быть выполнен расчёт продолжительности формирования электропоражающего фактора – количества электричества (q) в цепи утечки $R_{ут} = 1$ кОм, превышающего 50 мА·с, в условиях эксплуатации электросети с различными величинами ёмкости изоляции при наличии/отсутствии средств компенсации этой ёмкости. В качестве исходного параметра принимается измеренная величина разности потенциалов (U_{VPP}) между амплитудами обеих полярностей напряжения на резисторе $R_{ут}$. В этом случае действующее значение напряжения на этом резисторе будет равно:

$$\Delta U = U_{VPP} \frac{1}{2\sqrt{2}} \quad , \quad (1.23)$$

а ток в цепи $R_{ут}$ будет определяться из соотношения: $I = \Delta U / R_{ут}$ (мА). Тогда продолжительность достижения количеством электричества q в цепи утечки $R_{ут}$ величины 50 мА·с, учитывая линейность нарастания параметра q при постоянстве величины параметра I будет определяться соотношением: $t_{50} = 50/I$ (с). Результаты расчёта сведены в таблицу 1.8.

Таблица 1.7 – Соотношение амплитуд падений напряжения ΔU_m на сопротивлении резистора утечки тока на землю $R_{ут} = 1$ кОм в установившихся режимах «после/до» подключения дополнительных ёмкостей $C_{из доп.}$ в цепях «фаза – земля»

Измеряемое соотношение	Исходная ёмкость изоляции сети, мкФ/фазу	Величина $C_{из доп.}$, мкФ/фазу					Автокомпенсатор АЗУР-1
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
$\Delta U_{m уст2}/\Delta U_{m уст1}$	0,25	1,06	1,43	1,92	2,29	2,38	включен
		1,36	1,70	2,00	2,25	2,39	отключен
	0,45	1,34	1,62	1,67	1,68	1,68	включен

Масштабированием результатов расчётов на сетях линейных напряжений 660 В и 1140 В установлено, что в первом случае параметры ΔU ; I будут увеличены в $\sqrt{3}$ раза, а во втором – в 3 раза. Во столько же раз будут уменьшены параметры t_{50} , что ускоряет формирование электропоражающего фактора.

Таким образом, функциональность АК в структуре аппарата «АЗУР-1» состоит в снижении величины тока в цепи утечки на землю не более, чем на 2/3 от величины тока при отсутствии компенсации при ёмкости изоляции сети $C_{из} \leq 1,0$ мкФ/фазу. При наличии значительных ёмкостей изоляции ($C_{из} \geq 3,0$ мкФ/фазу) уровень недокомпенсации сети существенно возрастает. Это повышает риск электротравматизма, что предопределяет неприемлемость применения АК ёмкостных токов в шахтных участковых электрических сетях высокой мощности повышенных (1140 В) уровней номинального напряжения.

Ограниченные функциональные возможности АК ёмкости изоляции сети, применяемой в аппаратах защиты от утечек тока на землю, подтверждаются и их разработчиками. Так, из источника [50] следует, что попытки перенести способ автокомпенсации, реализуемый в сети напряжением 660 В, на аппаратуру автоматического защитного отключения сети напряжением 1140 В не увенчались успехом. Это объясняется тем, что при напряжении 1140 В требуется значительно бóльшая эффективность устройства компенсации, так как необходимо снизить до 60 - 70 мА ток уже не с 260 мА, а с 450 мА, т.е., требуется значительно бóльшая добротность компенсирующего дросселя и точность его настройки.

Таблица 1.8 – Расчётные продолжительности формирования электропоражающего фактора ($q > 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$) в цепи утечки ($R_{\text{ут}} = 1 \text{ кОм}$) в электрической сети напряжения 380 В при $C_{\text{из}} = \text{var}$; $R_{\text{из}} = 1 \text{ МОм/фазу}$

Измеренные и рассчитанные параметры	Величина ёмкости изоляции сети $C_{\text{из}}$, мкФ/фазу					
	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
Автокомпенсатор ёмкости изоляции сети включен						
Параметр U_{VPP} (В)	57,60	60,80	82,40	104,00	132,00	136,00
Параметр ΔU (В)	20,37	21,50	29,14	36,78	46,68	48,09
Ток I в цепи $R_{\text{ут}} = 1000 \text{ Ом}$, (мА)	20,37	21,50	29,14	36,78	46,68	48,09
Параметр t_{50} (с)	2,45	2,32	1,71	1,36	1,07	1,04
Автокомпенсатор ёмкости изоляции сети отключен						
Параметр U_{VPP} (В)	154,00	210,00	262,00	308,00	346,00	368,00
Параметр ΔU (В)	54,46	74,26	92,64	108,91	122,35	130,13
Ток I в цепи $R_{\text{ут}} = 1000 \text{ Ом}$, (мА)	54,46	74,26	92,64	108,91	122,35	130,13
Параметр t_{50} (с)	0,92	0,67	0,54	0,46	0,41	0,38

Следует также отметить, что применение автоматической компенсации ёмкости обуславливает протекание индуктивного тока по цепи заземления и, в случае её повреждения, возможно возникновение открытого электрического искрения. Данное искрение даже при небольших значениях ёмкости сети по отношению к земле может обладать высокой воспламеняющей способностью и представлять реальную опасность в шахтах, опасных по газу или пыли.

В качестве альтернативного решения для сетей напряжения 1140 В с ёмкостью изоляции $C_{\text{из}} \leq 1,0 \text{ мкФ/фазу}$ в настоящее время применяется способ автоматического ускоренного выявления повреждённой фазы и закорачивания её на землю через сопротивление малой величины ($R=100 \text{ Ом}$) как средство ограничения количества электричества q (мА·с) в теле человека.

1.3.2 Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю

Применительно к исследованию защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы (КЗПФ) в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю, определению «повреждённая фаза» соответствует фазный проводник с присоединением цепи утечки ($R_{\text{ут}}$) тока на землю. Поскольку защитная функция КЗПФ состоит в закорачивании на землю «повреждённой» фазы в процессе защитного отключения сети, принципиальную важность имеет задача гарантированного выявления «повреждённой» фазы, так как в противном случае к земле будет присоединена фаза, смежная с «повреждённой», и человек в состоянии касания к «повреждённой» фазе окажется под действием линейного напряжения сети.

Согласно [50, с. 94-98], «повреждённой» фазе соответствует минимальная из измеренных разность потенциалов $\Delta U_{\text{ф-з}}$ между фазами сети и землёй ($\Delta U_{\text{А-з}}$; $\Delta U_{\text{В}}$; $\Delta U_{\text{С-з}}$). Таким образом, устойчивость выполнения защитной функции будет определяться существенностью различий измеренных величин ($\Delta U_{\text{ф-з}}$). В этом случае важно установить степень влияния параметров электрической сети на процессы формирования указанных разностей потенциалов в условиях возникновения цепи утечки тока на землю.

Изменения параметров $\Delta U_{\text{ф-з}}$ в этом случае (применительно к фазам «А»; «В»; «С») будут определяться величинами напряжения смещения нейтрали U_{N} вследствие появления несимметрии в нагрузке. Расчётная схема электрической сети с проводимостью ($1/R_{\text{ут}}$) утечки тока на землю представлена на рисунке 1.19. Применительно к данной схеме активные сопротивления изоляции фаз R_1 ; R_2 ; R_3 равны между собой и определяются техническим состоянием кабельной сети. В случае появления утечки тока на землю активное сопротивление цепи между третьей фазой и землёй снижается до величины:

$$R_{\Sigma} = R_1 \cdot R_{ym} / (R_1 + R_{ym}) \quad , \quad (1.24)$$

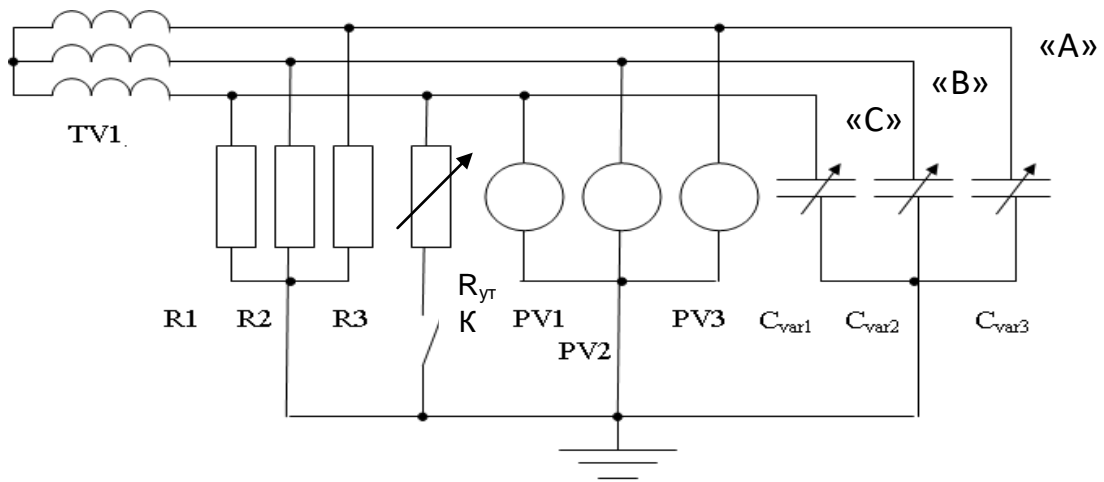


Рисунок 1.19 – Расчётная схема участковой электрической сети с проводимостью ($1/R_{yt}$) утечки тока на землю для исследования распределения разностей потенциалов $\Delta U_{\phi-3}$ с учётом непостоянства величин ёмкости изоляции (C_{var}) сети и сопротивления утечки тока на землю (R_{yt})

Для этой схемы комплексные проводимости изоляции между фазами «А»; «В»; «С» сети и землёй выражаются соотношениями, соответственно:

$$Y_{A-3} = \sqrt{\frac{1}{R_3^2} + (2\pi f C_{var3})^2} \quad , \quad (1.25)$$

$$Y_{B-3} = \sqrt{\frac{1}{R_2^2} + (2\pi f C_{var2})^2} \quad , \quad (1.26)$$

$$Y_{C-3} = \sqrt{\frac{1}{R_{\Sigma}^2} + (2\pi f C_{var1})^2} \quad . \quad (1.27)$$

При касании человека к одной из фаз вследствие нарушения симметрии сети вектор напряжения \dot{U}_N и ток, протекающий через тело человека

(сопротивление цепи утечки ток на землю) будут описываться уравнениями, соответственно, 1.17-1.20, что позволит определить токи через импеданс ($Z=1/Y$) изоляции 1-й (А), 2-й (В) и 3-й (С) и использовать полученные соотношения для определения величин разностей потенциалов между фазами сети и землёй в условиях изменяемой ёмкости изоляции сети при подключении/отключении кабельных присоединений и изменяемого в ограниченных пределах сопротивления тела человека.

Схемой КЗПФ производится измерение напряжений первой, второй и третьей фаз относительно земли и определение минимального из них:

$$U_{10} = U \sqrt{1 - (1 + 2K_1) \cdot a} \quad , \quad (1.28)$$

$$U_{20} = U \sqrt{1 + (2 + K_1 - \sqrt{3} K_2) \cdot a} \quad , \quad (1.29)$$

$$U_{30} = U \sqrt{1 + (2 + K_1 + \sqrt{3} K_2) \cdot a} \quad , \quad (1.30)$$

где $a = 1 + K_1(2 + K_1) + K_2^2$; $K_1 = R_{ут} / R_{из}$; $K_2 = R_{ут} / X_{из}$; $R_{ут}$ – сопротивление утечки на землю (сопротивление тела человека, прикоснувшегося к фазе сети); $R_{из}$; $X_{из}$ – соответственно, активное и ёмкостное сопротивления изоляции сети.

Рассмотрим, как влияет ёмкость изоляции сети, а также величина сопротивления утечки на параметры U_{10} ; U_{20} ; U_{30} . Расчётной схеме (Рисунок 1.19) соответствует схема компьютерной модели объекта (Рисунок 1.20), где представлена электрическая сеть напряжения 1140 В с фазными напряжениями: $u_{\phi 1} = U_m \sin \omega t$; $u_{\phi 2} = U_m (\sin \omega t + 2\pi/3)$; $u_{\phi 3} = U_m (\sin \omega t + 4\pi/3)$ [51].

К фазе напряжения $U_m (\sin \omega t + 4\pi/3)$ параллельно комплексному сопротивлению изоляции присоединено сопротивление утечки $R_{ут}$ на землю. При варьировании ёмкостей изоляции и сопротивления утечки определены разности потенциалов между фазами (с фазными напряжениями: $u_{\phi 1}$; $u_{\phi 2}$; $u_{\phi 3}$) и землёй, соответственно, ΔU_1 ; ΔU_2 ; ΔU_3 (Рисунок 1.21).

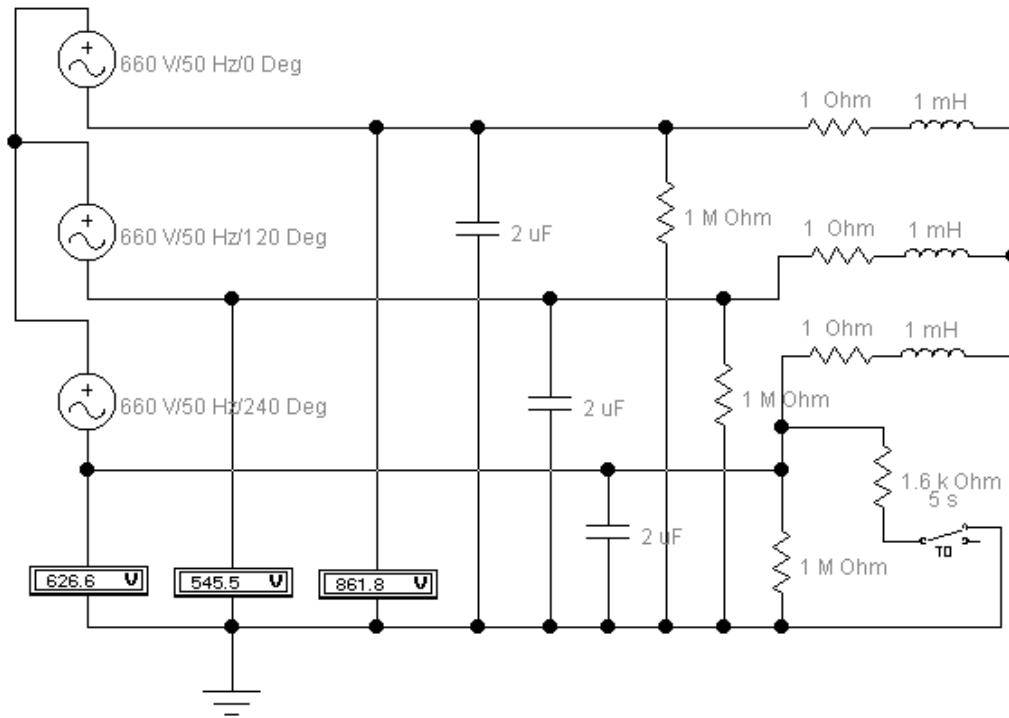


Рисунок 1.20 – Модель исследования распределения разностей потенциалов «фаза – земля» в шахтной участковой электрической сети линейного напряжения 1140 В в зависимости от ёмкости изоляции при возникновении однофазной утечки тока на землю

Та же модель исследована применительно к параметрам комбинированной электрической сети участка шахты, адаптированной к эксплуатации частотно-управляемых асинхронных электроприводов подачи очистных комбайнов серий УКД; КДК. Для них диапазон линейных напряжений составляет $\Delta U_c = 56 \div 950$ В, минимальная частота напряжения – $f_{\min} = 2,5$ Гц. Максимальные частоты напряжения питания для комбайнов: УКД 300: $f_{\max} = 70,6$ Гц; КДК 500; КДК 700: $f_{\max} = 125$ Гц; КДК 400: $f_{\max} = 87,5$ Гц [52]. При моделировании принимаем максимальные уровни частот и величин напряжений, подаваемых на электроприводы подачи комбайнов в предположении, что на статор АД подаётся напряжение синусоидальной формы, и узел выявления повреждённой фазы предусмотрен на выходе преобразователя частоты. Результаты исследования приведены на рисунке 1.22.

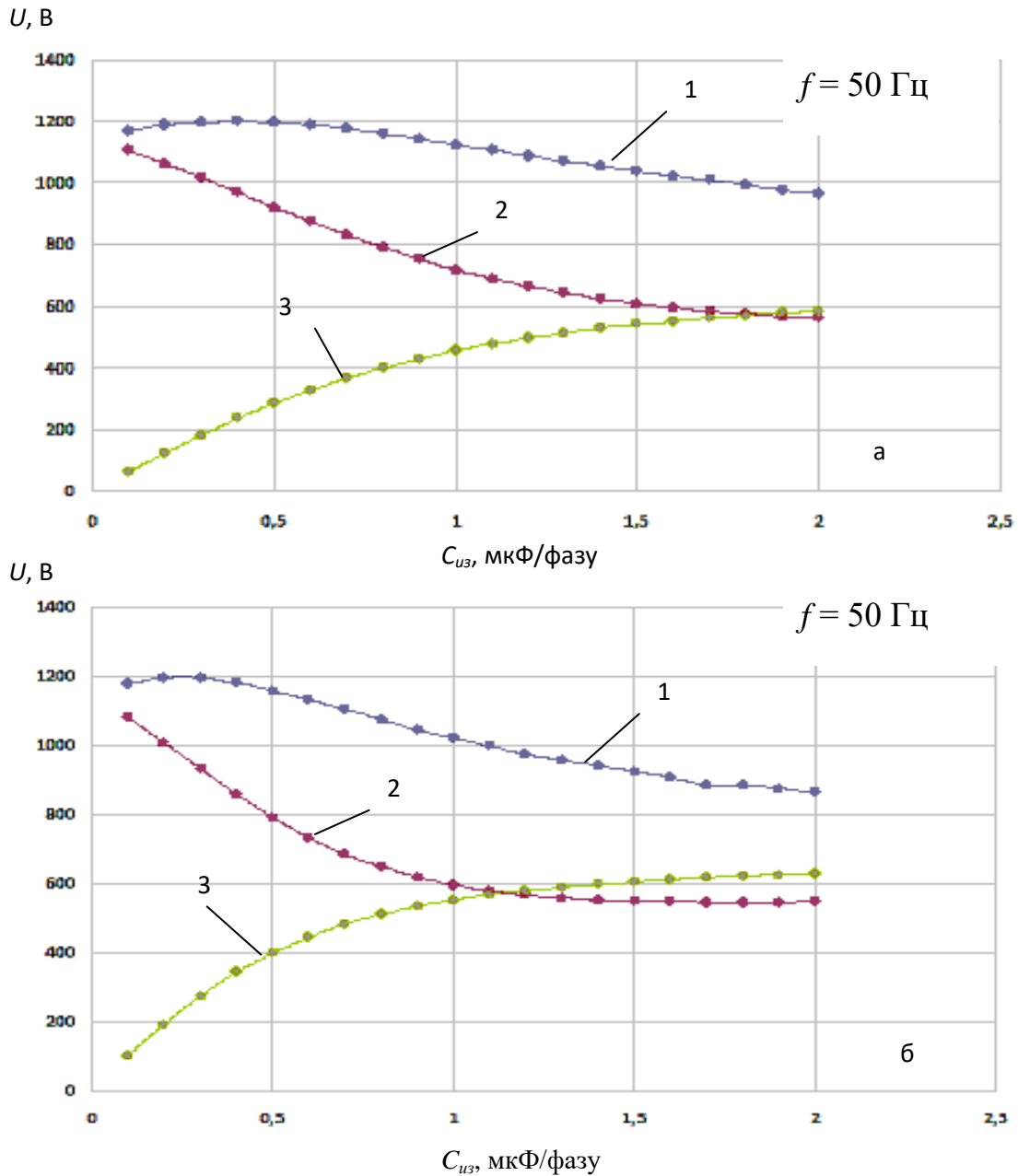


Рисунок 1.21 – Графики изменения разностей потенциалов между землёй и фазами в шахтной электрической сети линейного напряжения 1140 В в зависимости от ёмкости изоляции ($C_{из}$) при возникновении утечки тока на землю в фазе напряжения $U_m (\sin \omega t + 4\pi/3)$: а – сопротивление утечки $R_{ут} = 1 \text{ кОм}$; б – сопротивление утечки $R_{ут} = 1,6 \text{ кОм}$; 1 – фаза напряжения $U_m (\sin \omega t)$; 2 – фаза напряжения $U_m (\sin \omega t + 2\pi/3)$; 3 – фаза напряжения $U_m (\sin \omega t + 4\pi/3)$

Из результатов моделирования следует, что с увеличением частоты напряжения сети точка равенства разностей потенциалов ΔU_2 и ΔU_3 относительно земли (соответственно, фазы напряжения $U_m(\sin \omega t + 2\pi/3)$ и фазы напряжения $U_m(\sin \omega t + 4\pi/3)$ с цепью утечки на землю ($R_{ут} = 1 \text{ кОм}$) смещается в сторону низких величин ёмкости изоляции сети, что препятствует применению кабелей

больших сечений и протяжённости, соответствующих параметрам электропотребителей высокой мощности.

На величины разностей потенциалов между фазами сети и землёй существенно влияют как ёмкости изоляции фаз относительно земли, так и величины сопротивления утечки. Соотношением этих параметров определяется точка $\Delta U_2 = \Delta U_3$, после которой при увеличении ёмкости изоляции сети схемой КЗПФ аппарата защиты в качестве «повреждённой» будет определена фаза с параметром ΔU_2 , а не ΔU_3 . Закорачивание её на землю смертельно опасно для человека, прикоснувшегося к фазе напряжения с параметром ΔU_3 .

При сопротивлении утечки на землю $R_{ут} = 1$ кОм в сети с ёмкостью изоляции максимально допустимой величины $C_{из} = 1,0$ мкФ/фазу, регламентированной нормативами, величины разностей потенциалов между землёй и смежными фазами сопоставимы. Так, в сети линейного напряжения 1140 В для фазы напряжения $U_m (\sin \omega t + 2\pi/3)$ эта разность потенциалов составляет $\Delta U_2 = 718$ В, а для напряжения фазы $U_m (\sin \omega t + 4\pi/3)$, соответственно, $\Delta U_3 = 455$ В. Однако, уже при ёмкости изоляции 1,8 мкФ/фазу эти соотношения становятся практически равными: $\Delta U_2 = 573$ В; $\Delta U_3 = 569$ В, и уже при ёмкости изоляции 1,9 мкФ/фазу значения этих величин составляют: $\Delta U_2 = 566$ В; $\Delta U_3 = 577$ В.

При эксплуатации высокоомощного технологического электрооборудования на участках шахт в большом количестве должны использоваться гибкие кабели марки КГЭШ с площадью сечения фазных проводников 35 мм²; 50 мм²; 70 мм²; 95 мм² с удельными ёмкостями изоляции, соответственно: 0,52 мкФ/км; 0,67 мкФ/км; 0,87 мкФ/км; 1,15 мкФ/км [53, 54]. Это доказывает высокую вероятность появления ёмкости между фазами сети и землёй, превышающей 1,0 мкФ/фазу.

Внимания заслуживает также факт того, что сопротивление тела человека в силу его физиологических особенностей и конкретной величины сопротивления точки касания к фазному проводнику может отличаться от нормируемого ($R_{ут} = 1$ кОм). Исследованиями установлено, что даже незначительное увеличение

этого параметра ведёт к интенсивному сближению величин рассматриваемых разностей потенциалов (Рисунок 1.21б). Так, при сопротивлении утечки землю $R_{ут} = 1,6$ кОм в сети с ёмкостью изоляции $C_{из} = 1$ мкФ/фазу: $\Delta U_2 = 594$ В; $\Delta U_3 = 551$ В, что повышает вероятность ложного определения повреждённой фазы. Но уже при ёмкости изоляции $C_{из} = 1,2$ мкФ/фазу: $\Delta U_2 = 566$ В; $\Delta U_3 = 578$ В, вследствие чего в качестве повреждённой будет выявлена и закорочена на землю смежная с ней фаза, что недопустимо. Соотношения $R_{ут\,fix.} = f(C_{из})$ при $f_c = 50$ Гц и $C_{из} = f(f_c)$ при $R_{ут} = 1,0$ кОм, которым соответствует равенство параметров ΔU_2 и ΔU_3 представлены графиками (Рисунок 1.23) и регрессионными зависимостями при $R_{ут\,fix.}$ (кОм), $C_{из}$ (мкФ/фазу), f_c (Гц) [51, с.46-53]:

$$R_{ут\,fix.} = 1 / (0,01 + 0,54 C_{из}) \quad , \quad (1.31)$$

$$C_{из} = (9 / (2 + f_c / 25)) - 0,5 \quad , \quad (1.32)$$

Применительно к реальным условиям эксплуатации, когда $R_{ут\,fix.} \neq 1,0$ кОм, будет исключена функция КЗПФ в шахтных участковых электросетях с ёмкостью изоляции $C_{из} \geq (G_{ут\,fix.} - 0,01) / 0,54$ (мкФ/фазу), где $G_{ут\,fix.} = 1 / R_{ут\,fix.}$.

Из анализа диаграмм (Рисунок 1.21а, Рисунок 1.22) следует, что применительно к комбинированным электрическим сетям при $f > 50$ Гц, функция КЗПФ исключается в случае, если ёмкость изоляции присоединения:

$$C_{из} \geq (9 / (2 + f_c / 25)) - 0,5 \quad . \quad (1.33)$$

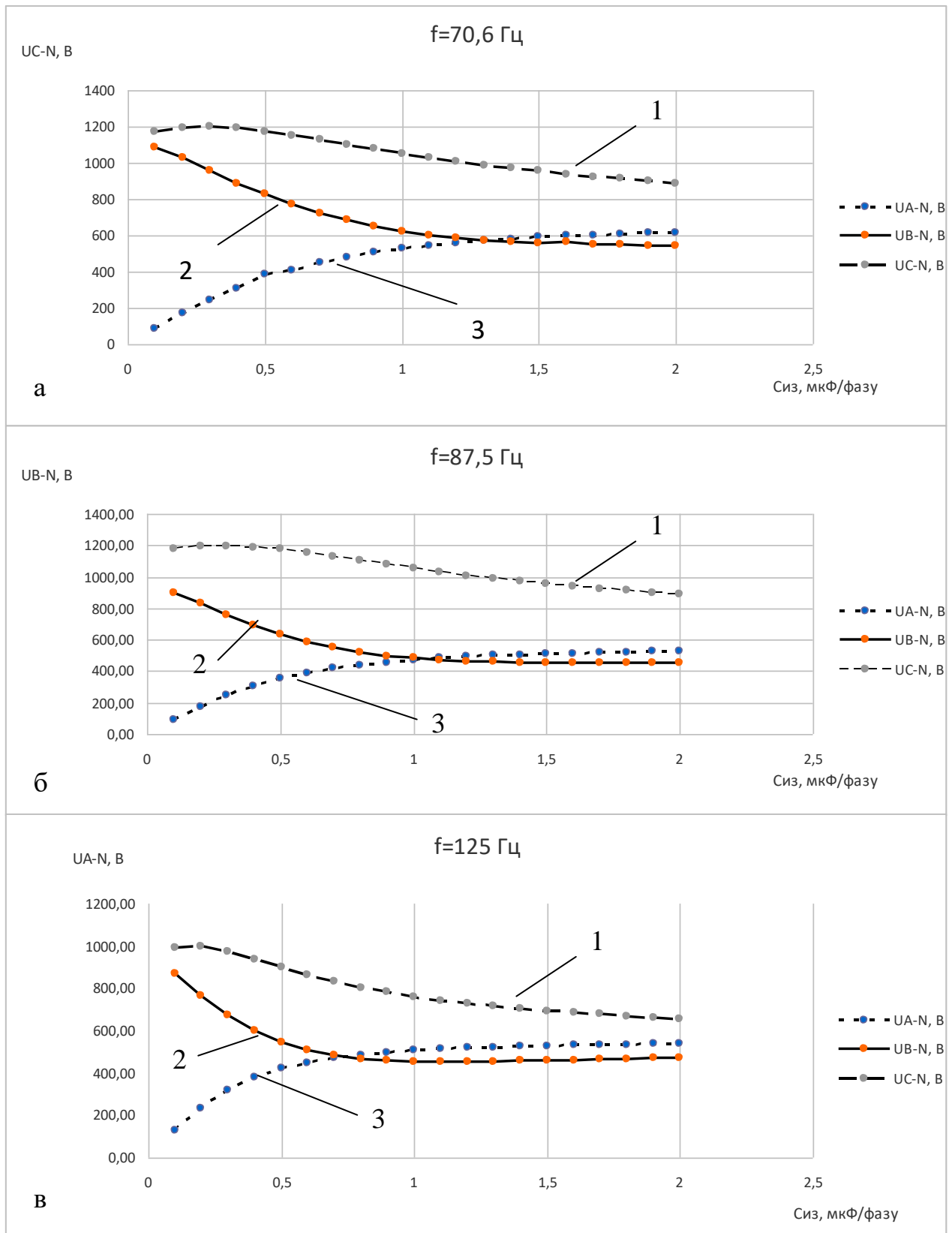


Рисунок 1.22 – Графики изменения разностей потенциалов между землёй и фазами в сети линейного напряжения 950 В аналогично исследованию (Рисунок 1.26): а – частота 70,6 Гц; б – частота 87,5 Гц; в – частота 125 Гц

Это свидетельствует об ограничении применения способа выявления повреждённой фазы на основе определения минимальной разности потенциалов между фазами и землёй в сетях, с потребителями высокой мощности (оснащённых кабелями значительных сечений и протяжённости), в том числе, в условиях, когда $R_{\text{ут fix}} > 1,0$ кОм, а также к присоединениям комбинированных сетей, где частота напряжения $f > 50$ Гц.

В этой связи к промышленной реализации предложен «фазовый» способ выявления повреждённой фазы, суть которого состоит в назначении опорных фазных промежутков относительно фазных напряжений сети и фиксации фазы сети как повреждённой при обнаружении соответствия начальной фазы напряжения нулевой последовательности одному из опорных фазовых параметров, что иллюстрируется диаграммами (Рисунок 1.24) [55].

Так, при наличии утечки тока на землю в фазе А положительные перепады тактовых импульсов $z1$ и $z2$ приходятся на время действия опорных импульсов a_1 и a_2 . По положительным перепадам тактовых импульсов два триггера, относящихся к этой фазе, переходят в активное состояние (единичные сигналы на их выходах: $Q^1_A = Q^2_A = 1$). Единичное состояние выхода одного из этих триггеров – это предварительный результат определения повреждённой фазы.

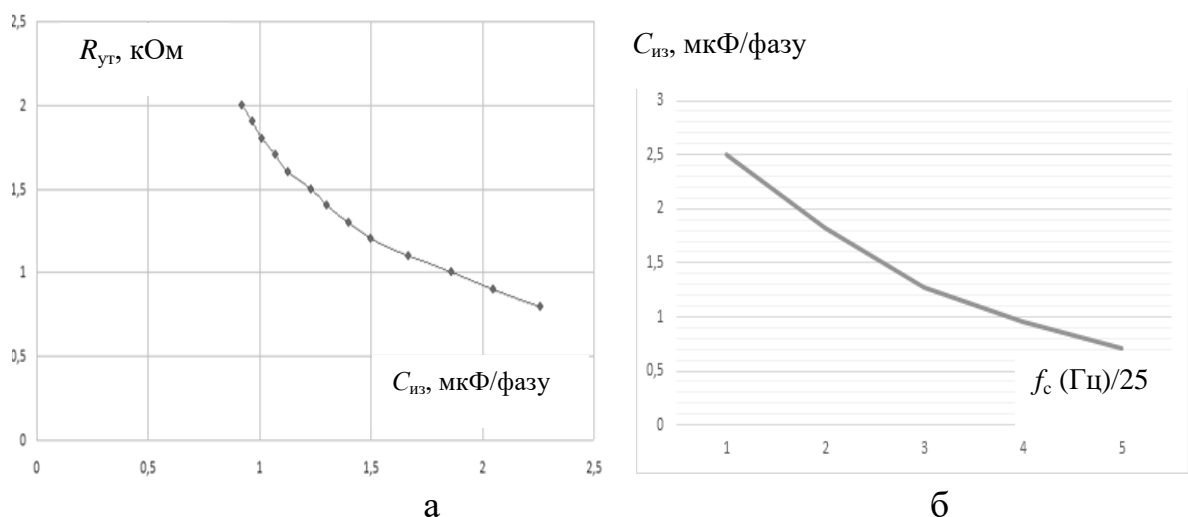


Рисунок 1.23 – Графики соотношений $R_{\text{ут fix}} = f(C_{\text{из}})$ при $f_c = 50$ Гц (а) и $C_{\text{из}} = f(f_c)$ при $R_{\text{ут}} = 1,0$ кОм (б), которым соответствует равенство разностей потенциалов между землёй и повреждённой (напряжение $U_m (\sin \omega t + +4\pi/3)$), а также смежной с ней (напряжение $U_m (\sin \omega t + 2\pi/3)$) фазами сети

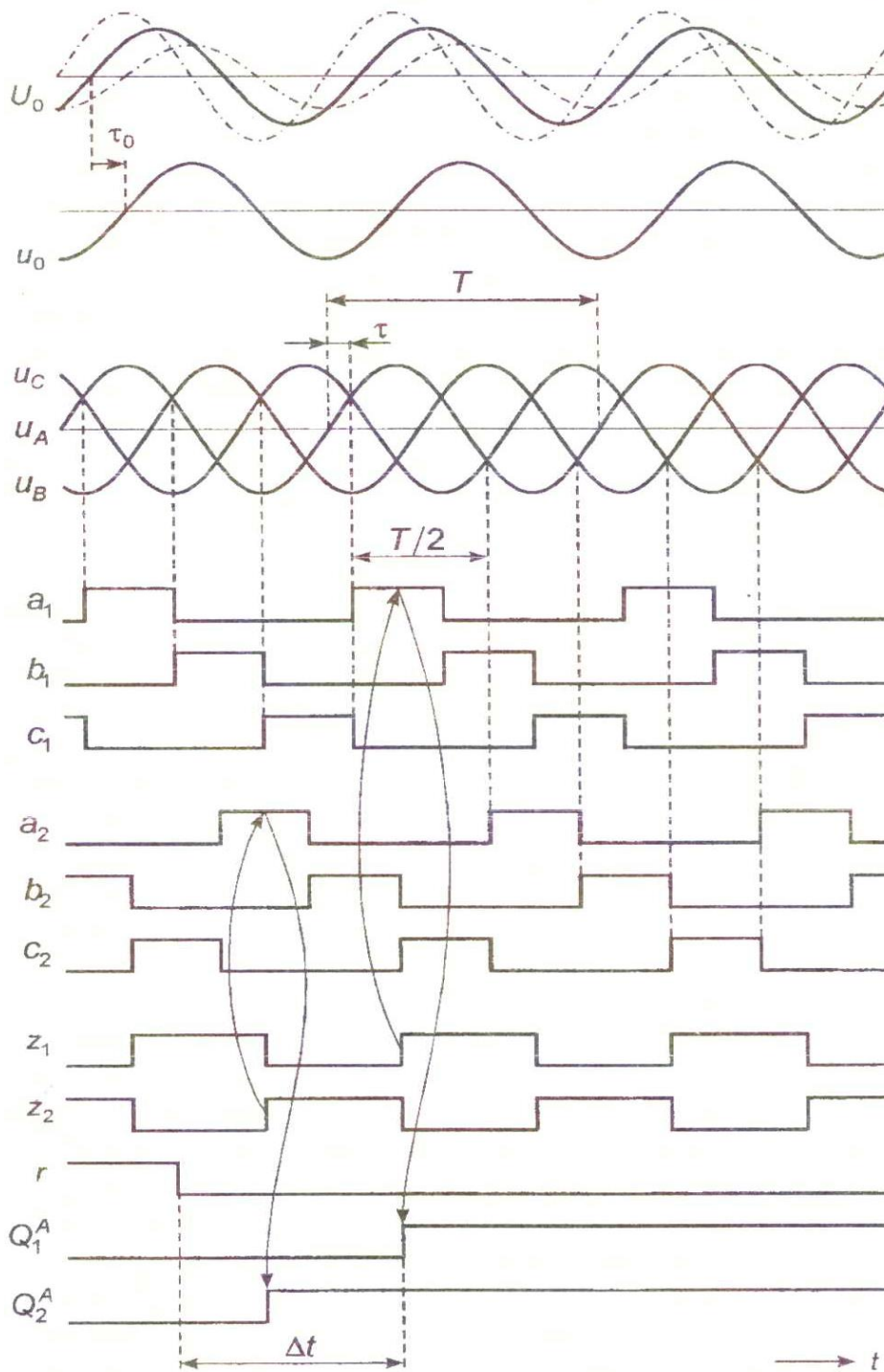


Рисунок 1.24 – Диаграммы параметров устройства выявления «повреждённой» фазы на основе применения «фазового» метода: U_A, U_B, U_C – сигналы пропорциональные фазным напряжениям сети; $a_1, b_1, c_1; a_2, b_2, c_2$ – соответственно, первые и вторые опорные импульсы; z_1, z_2 – соответственно, первые и вторые тактовые импульсы

Однако данный способ отличается сложностью реализации, исключает применение индуктивных средств компенсации ёмкостных токов, критичен к возможным колебаниям фазовых параметров напряжения сети

1.4 Анализ специфики функционирования автоматического защитного отключения комбинированных шахтных участковых электрических сетей

Опытом эксплуатации очистных комбайнов в забоях угольных шахт доказана актуальность применения в структуре этих горных машин электроприводов с возможностью регулирования угловой скорости электродвигателей в широком диапазоне. Техническим решением этой задачи явилось применение преобразователя частоты со звеном постоянного тока (ПЧ-ПТ) в структуре асинхронного электропривода.

В этом случае шахтная участковая электрическая сеть, содержащая силовые присоединения, функционирующие при постоянной ($f = 50$ Гц) и переменной ($0 < f \leq 125$ Гц) частоте напряжения, является комбинированной (Рисунок 1.25), и в ней формируются возмущающие воздействия, препятствующие функционированию технических средств автоматической защиты человека от электропоражения.

Исследованиями [56, 57] установлено, что в комбинированных электрических сетях:

— при возникновении утечки или при плавном снижении сопротивления изоляции в звене постоянного тока ПЧ-ПТ между сетью и землей возникает второй источник постоянного напряжения, что создаёт эффект блокирования измерительного органа аппарата защиты, и утечка тока в сети не будет выявлена и отключена;

— наличие в ПЧ-ПТ звена постоянного тока не позволяет схеме КЗПФ, подключенной со стороны его входа, выявить поврежденную фазу после преобразователя и произвести её защитное шунтирование;

– после отключения в АД подачи после преобразователя частоты возникает ЭДС выбега форма и частота которой, отличается от напряжения сети.

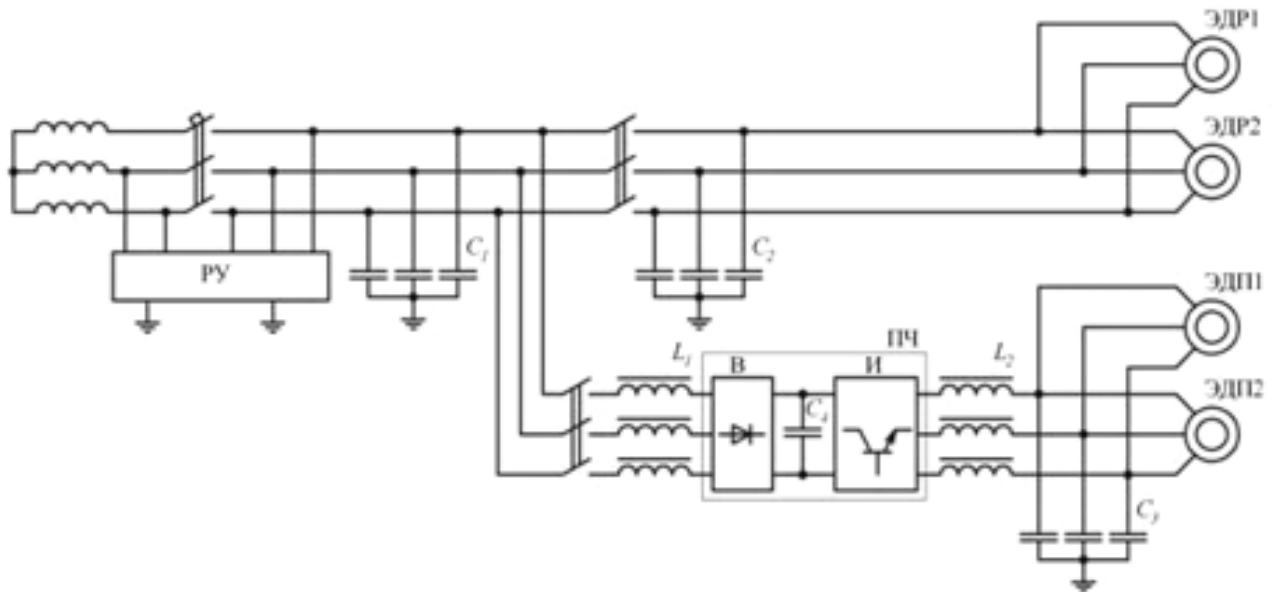


Рисунок 1.25 – Расчётная схема комбинированной электрической сети: ПЧ – преобразователь частоты; В – выпрямитель; И – инвертор; ЭДР1, ЭДР2 – АД резания очистного комбайна; ЭДП1, ЭДП2 – АД подачи очистного комбайна; C_1 – суммарная ёмкость изоляции ответвлений схемы электроснабжения участка сети; C_2 – ёмкость изоляции кабеля, питающего АД резания; C_3 – ёмкость изоляции кабеля, питающего АД подачи комбайна; C_4 – ёмкость изоляции звена постоянного тока; L_1, L_2 – индуктивности входного и выходного дросселей

Установлено также наличие взаимного влияния ёмкостей изоляции (между фазами и землёй) различных участков сети на переходные процессы формирования токов утечки в любых участках сети: звена переменного тока постоянной и изменяющейся частоты и звена постоянного тока. Так, ток утечки в звеньях постоянной и изменяющейся частоты содержит составляющие частот 50 Гц и более, появляющиеся при коммутации вентилях выпрямителя и инвертора. Ток несимметричной утечки в звене постоянного тока содержит значительные переменные составляющие, преимущественно, частот 50 и 150 Гц.

В исследовании [57, с. 31-39] указывается, что выходное напряжение ПЧ-ПТ содержит наложенные высокочастотные гармоники, величина и уровень которых зависят от заданной частоты и составляют до 12 %, что принимается в качестве базовой величины для расчёта токов утечки на землю. Относительный уровень гармоник обратно пропорционален частоте выходного напряжения ПЧ-

ПТ и имеет максимальное значение при частоте этого напряжения, близкой к нулю. В самом полупериоде выходного напряжения уровень высокочастотных составляющих изменяется от максимального значения в начальной и конечной стадии до минимального в середине. Расчётные значения тока утечки в цепи сопротивления $R_{ут} = 1$ кОм представлены в таблице 1.9 и подтверждают существенное влияние ёмкости изоляции сети на его величину ($I_{ут} \gg 25$ мА).

Средством технической реализации защиты человека от электропоражения в шахтной участковой комбинированной сети явилась система АЗУР-4ПП (Рисунок 1.26) [58], действие которой заключается в следующем. В случае снижения сопротивления изоляции сети до ПЧ-ПТ блок 1 срабатывает и замыкает свои контакты в контуре устройства отключения коммутационного аппарата 4 и в контуре блока принудительного отключения 8 силовых полупроводниковых приборов (СПП). Компенсатор 2 ёмкостных токов утечки функционирует после отключения коммутационного аппарата 4 и, будучи статическим, компенсирует только часть ёмкостной составляющей тока. Защитная функция сопровождается также выбором повреждённой фазы (блок 3) и закорачиванием её на землю через сопротивление малой величины. При возникновении утечки тока на землю в сети после ПЧ-ПТ 6 блок 1 управляет отключением коммутационного аппарата 4 и включением блока принудительного отключения 8, что приводит к запираанию силовых ключей ПЧ-ПТ и отключению коммутационного аппарата 7 и включению короткозамыкателя 9. Последний на время до 1,0 с, замыкает три фазы между собой, снимая тем самым ЭДС выбега АД. Блок 3 при этом не срабатывает, а блок 2 выполняет свои функции в штатном режиме.

В случае снижения сопротивления изоляции в звене постоянного тока ПЧ-ПТ возможен режим блокирования работы блока 1 в связи с появлением напряжения между фазой сети и землей, направленного встречно измерительному напряжению аппарата. Блок 10 контроля сопротивления изоляции звена постоянного тока при снижении этого параметра ниже допустимого уровня формирует команду на отключение и блокировку коммутационного аппарата 7. Блок 3 включается после отключения этого коммутационного аппарата

Таблица 1.9 – Расчётные значения тока утечки на землю в цепи сопротивления $R_{ут} = 1$ кОм в комбинированной сети участка шахты при различных частотах выходного напряжения ПЧ-ПТ

Параметр	Величина параметра при ёмкости сети (С, мкФ/фазу)				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Выход ПЧ-ПТ (частота напряжения 50 Гц)					
Ток утечки при $f=50$ Гц $I_{ут}(1)$, А	0,111	0,21	0,293	0,358	0,408
Ток утечки на выходе ПЧ-ПТ $I_{ут}$, А	0,314	0,368	0,422	0,47	0,509
$I_{ут}/I_{ут}(1)$	2,83	1,749	1,44	1,312	1,248
Выход ПЧ-ПТ (частота напряжения 5 Гц)					
Ток утечки при $f=50$ Гц $I_{ут}(1)$, А	0,013	0,024	0,035	0,046	0,057
Ток утечки на выходе ПЧ-ПТ $I_{ут}$, А	0,113	0,148	0,224	0,249	0,266
$I_{ут}/I_{ут}(1)$	8,966	7,75	6,448	5,443	4,686
Выход ПЧ-ПТ (частота напряжения 70 Гц)					
Ток утечки при $f=50$ Гц $I_{ут}(1)$, А	0,172	0,308	0,4	0,459	0,496
Ток утечки на выходе ПЧ-ПТ $I_{ут}$, А	0,346	0,431	0,5	0,549	0,581
$I_{ут}/I_{ут}(1)$	2,00	1,402	1,254	1,2	1,17

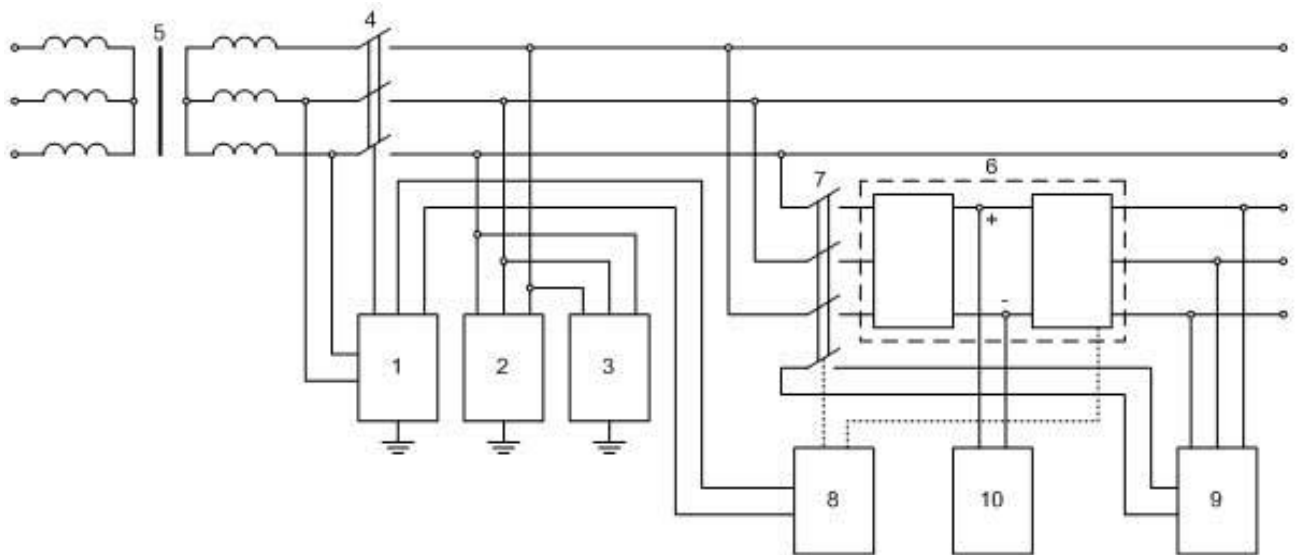


Рисунок 1.26 – Блочно-структурная схема системы комплексной автоматической защиты АЗУР-4ПП: 1 - блок контроля сопротивления изоляции сети; 2 - компенсатор ёмкостных токов утечки; 3 - блок защитного заземления фазы сети с поврежденной изоляцией; 4, 7 - коммутационные аппараты, 5 - трансформатор КТП; 6 - ПЧ-ПТ; 8 - блок принудительного отключения; 9 - короткозамыкатель, 10 - блок контроля сопротивления звена постоянного тока.

К проблемным вопросам, связанным с эксплуатацией системы АЗУР-4ПП следует отнести общую сложность конструкции, схемы соединения элементов системы с функциональными узлами ПЧ-ПТ, наличие временных задержек, связанных с многочисленными коммутациями (в том числе, в определённом порядке) структурных компонентов системы в процессе защитного отключения, применении не полной компенсации ёмкостного тока утечки в условиях формирования его высокочастотных составляющих. При этом система АЗУР-4ПП не устраняет электропоражающий фактор, действующий в комбинированной электрической сети участка и обусловленный ёмкостными проводимостями изоляции, и не снижает его параметры до безопасного уровня.

При анализе эффективности автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети следует также учитывать инерционность выполнения защитной функции. Это подтверждается техническими характеристиками средств защитного отключения, в соответствии с которыми собственное время срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю вне зависимости от применённых компонентов электрической схемы в сети линейного напряжения 660 В при сопротивлении утечки на землю 1 кОм и ёмкости изоляции в диапазоне $0 \div 1,0$ мкФ/фазу составляет порядка 0,1 с (таким образом, применение микропроцессора в схеме аппарата не приводит к улучшению его главной функции - к повышению быстродействия формирования команды на защитное отключение. В сети линейного напряжения 1140 В это время составляет 0,07 с, а время шунтирования повреждённой фазы достигает 0,17 с. [6, с. 369-370]. Кроме этого, выполнение защитной функции будет идти с дополнительной задержкой минимум 0,08 с, обусловленной временем собственного срабатывания автоматического выключателя АЗ792 КТП. В течение этих интервалов времени средства защитного отключения не будут препятствовать действию электропоражающих факторов в электрической сети.

С повышением мощностных показателей применяемого на участке шахты технологического оборудования увеличиваются электропоражающие параметры участковой электросети. Это, в свою очередь, предопределяет усложнение

алгоритма функционирования и аппаратной части (и, следовательно, снижение параметров надёжности) технических средств автоматической защиты от утечек тока на землю.

1.5 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования

1) Несмотря на реализацию режима изолированной нейтрали трансформатора при обустройстве и эксплуатации шахтной участковой электрической сети и применение в ней технических средств автоматической защиты от утечек тока на землю, такая сеть не является безопасной по фактору электропоражения человека. Так, в случае касания человеком, имеющим контакт с землёй, фазы сети, находящейся под напряжением, через его тело будет протекать ток вследствие наличия электрических проводимостей между фазами сети и землёй, обусловленных параметрами изоляции кабелей.

2) Заложенное в концепцию построения системы электроснабжения участка шахты требование обязательного заземления нестационарного (перемещаемого в процессе эксплуатации) электрооборудования (п.1.4.1 ГОСТ 28298-89 «Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля»), на практике реализуется подключением корпусов двигателей перемещаемых электроустановок к заземляющей сети участка посредством центральных проводов силовых гибких кабелей электропитания, присоединяемых к заземлённым металлическим корпусам соответствующих силовых коммутационных аппаратов (магнитных пускателей, станций управления), несмотря на то, что это противоречит п. 1.4.2 этого же нормативного документа, согласно которому «не допускается использовать корпуса электрооборудования в качестве заземляющих проводников».

3) Ёмкостная проводимость изоляции кабеля создаётся структурой взаимного расположения в нём изолированных фазных проводов и центрального провода. Присоединение последнего к элементам заземляющей сети участка

шахты преобразует ёмкостную проводимость между фазными и центральными проводами кабелей в ёмкостную проводимость между фазами электрической сети и землёй, обуславливая, тем самым, формирование электропоражающего фактора.

4) Функция автоматической защиты от утечек тока на землю сведена к ограничению количества электричества в теле человека, по которому уже протекает ток электропоражающей величины, а не к изначальной минимизации этого тока в диапазоне безопасных величин. При этом, данная защита воздействует централизованно на всю электрическую сеть участка шахты, управляя отключением автоматического выключателя участковой КТП, что говорит об отсутствии селективности защитной функции.

5) Тенденция повсеместного применения в структуре технологического оборудования участков шахты электромеханических установок высокой мощности обуславливает необходимость использования силовых кабелей больших сечений и протяжённости (то есть кабелей с высокими ёмкостями изоляции). В условиях присоединения к заземлению центральных проводов кабельной сети это ведёт к существенному увеличению ёмкостной проводимости между фазами электрической сети и землёй и повышает риск поражения человека электрическим током при касании его к фазному проводнику, находящемуся под напряжением. Достижение защитной функции при этом предопределяет необходимость усложнения схемотехники автоматической защиты от утечек тока на землю, что снижает надёжность последней.

6) В части анализа функциональных свойств технических средств автоматической защиты от утечек тока на землю исследованием выявлен ряд факторов, ограничивающих область их применения системами электроснабжения потребителей, в основном, малой и средней мощности – электрическими сетями с ёмкостью изоляции относительно земли, не превышающей 1,0 мкФ/фазу.

7) Установлено что средствами автоматической компенсации ёмкости изоляции сети, применяемыми в аппаратах защиты от утечек тока на землю и функционирующими на основе корректировки индуктивности компенсирующего дросселя, ёмкостной ток в цепи утечки на землю может быть снижен не более,

чем на $2/3$ в сравнении с величиной ёмкостного тока при отсутствии его компенсации. Уровень недокомпенсации ёмкостного тока в цепи утечки на землю существенно возрастает с увеличением ёмкости изоляции сети.

8) Установлено, что факторами, ограничивающими область применения способа автоматического выявления повреждённой фазы, основанного на сопоставлении разностей потенциалов между фазами сети и землёй, являются ёмкость изоляции сети, частота тока сети, величина сопротивления однофазной утечки на землю. Увеличение каждого из упомянутых факторов ведёт к повышению разности потенциалов относительно земли повреждённой фазы и снижению разности потенциалов относительно земли смежной с ней фазы. При равенстве этих разностей потенциалов исключается возможность выявления повреждённой фазы. Исследованием установлена закономерность изменения отношений сопротивления цепи утечки тока на землю и ёмкости изоляции сети относительно земли, которым соответствует равенство разностей потенциалов между землёй и повреждённой, а также смежной с ней фазами сети.

9) Функционирование средств автоматического выявления повреждённой фазы, основанных на измерении фазовых соотношений токов и напряжений сети, не согласуется с применением средств индуктивной компенсации ёмкостных токов утечки на землю, что не способствует ограничению электропоражающего фактора, формируемого вследствие наличия ёмкости изоляции между фазами сети и землёй.

10) Негативным фактором, представляющим потенциальную опасность для персонала шахты, следует считать эффект воздействия ёмкостной проводимости изоляции кабелей на величину электрического тока в цепи заземления. Установлено, что с увеличением ёмкостной проводимости изоляции сети (между фазами и землёй) величина тока в цепи заземления участка шахты может достигать уровней, сопоставимых с величинами, предельно допустимыми по критерию искробезопасности, либо превосходить их. Увеличению тока в цепи заземления способствует появление цепи однофазной утечки тока на землю. При этом функционирование короткозамыкателя повреждённой фазы,

присоединяющего выявленную повреждённую фазу к заземлению через сопротивление малой величины (100 Ом), существенно повышает величину тока в элементах заземления, обуславливая опасность искрения в контактных соединениях, что представляет собой опасность для персонала шахты.

11) Изложенное позволяет сделать вывод о нерациональности самой концепции построения системы электроснабжения участка шахты, в соответствии с которой результатом заземления металлических корпусов нестационарного электрооборудования присоединением их к заземляющей сети посредством центральных проводов кабелей электропитания, является высокий уровень ёмкостной проводимости изоляции (между фазами сети и землёй), что превращает шахтную участковую электрическую сеть в объект потенциальной опасности поражения человека электрическим током.

12) При этом эффективность защитной функции заземления определяется качеством электрического контакта металлического корпуса с элементами цепи заземления, что делает показатель надёжности такой защиты соизмеримым с показателем надёжности локального устройства автоматического контроля и защиты, присоединяемого между компонентами электрической сети и корпусом электроустановки.

13) Уровень ёмкости изоляции сети (относительно земли) является фактором, ограничивающим функциональные возможности и область применения технических средств автоматической защиты от утечек тока на землю в шахтных участках электрических сетях, а также возможности применения технологического оборудования, оснащённого электроприводами высокой мощности. Применение электрических сетей с высокой ёмкостью изоляции (относительно земли) сопряжено с увеличением тока в элементах сети заземления, в том числе, до величин, превосходящих искробезопасные параметры.

14) В этой связи научную и практическую актуальность приобретают исследования и разработки в области совершенствования методов и технических средств автоматического защитного отключения силовых присоединений системы

электроснабжения участка шахты, исключаящих, в частности, формирование электропоражающих факторов, обусловленных ёмкостными проводимостями изоляции между фазами сети и землёй.

15) Указанными обстоятельствами обусловлена цель исследования – повышение эффективности обеспечения безопасных условий эксплуатации системы электроснабжения участка шахты на основе научного обоснования и практической реализации методов подавления электропоражающего фактора, обусловленного ёмкостью изоляции электрической сети, и совершенствования технических средств автоматического защитного отключения силовых электрических присоединений при локализации их компонентов в структурах асинхронных двигателей и коммутационного электрооборудования.

Для достижения этой цели должны быть решены следующие задачи:

- анализ специфики функционирования системы электроснабжения участка шахты в контексте обеспечения защиты персонала от поражения электрическим током и проблемных вопросов в области обеспечения безопасности эксплуатации силового рудничного электрооборудования;

- обоснование концепции построения системы электроснабжения участка шахты на основе применения технических решений подавления электропоражающего фактора при локализации в структуре её электродвигателей электропотребителей средств контроля и управления автоматическим защитным отключением;

- обоснование структуры функциональных узлов системы автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети, функционирующей в условиях применения средств подавления электропоражающего фактора.

РАЗДЕЛ 2

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА ШАХТЫ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ

2.1 Предпосылки технической реализации альтернативной концепции построения системы электроснабжения участка шахты

Заземление металлического корпуса электродвигателя предназначено для создания цепи тока с фазы на землю при возникновении контакта фазного проводника с этим корпусом и, тем самым, защиты человека от электропоражения в случае его прикосновения к корпусным элементам с данным видом повреждения. Практика эксплуатации свидетельствует о крайне низкой вероятности возникновения рассматриваемого потенциально опасного состояния. Так, анализ повреждаемости и причин отказов АД [59, 60, 61] даёт следующие статистические данные о количественных показателях аварийных (опасных) состояний: межвитковые замыкания – 93%,; пробой межфазной изоляции – 5%, пробой изоляции – 2%. Причиной 50% отказов являются эксплуатационные, связанные с неудовлетворительной защитой электродвигателей, что возможно в отношении электрических машин общепромышленного назначения, но исключено, если рассматривать АД рудничного взрывозащищённого исполнения.

Из причин отказов АД при их эксплуатации в условиях шахты, то есть, двигателей в рудничном взрывозащищённом исполнении (в отличие от общепромышленных условий применения), следует исключить отказы вследствие работы на двух фазах при срабатывании плавкого предохранителя максимальной токовой защиты и отсутствия (80% - общепромышленное применение), либо неисправности (20% - общепромышленное применение) тепловой защиты.

Применительно к электрическим машинам рудничного исполнения, эксплуатируемым в условиях шахты, такие отказы исключены, поскольку:

– исполнительными элементами защиты от коротких замыканий в шахтных участковых электрических сетях являются не плавкие предохранители, а трёхполюсные силовые коммутационные аппараты;

– тепловая защита АД реализуется устройствами непосредственного контроля (на основе датчиков – температурных реле, либо терморезисторов, встраиваемых в структуру двигателей) и дублируется устройствами косвенного контроля (устройства токовой защиты от перегрузок (ТЗП и аналогичные) в схемах магнитных пускателей, станций управления) [6, с. 424-520].

В конструкции АД применена пазовая (корпусная) изоляция, изоляция слоя, межслойная изоляция, отделяющие изолированные фазные проводники обмотки статора при их расположении в пазу магнитопровода от металлической поверхности последнего (Рисунок 2.1) [62, 63]. В качестве материалов изоляции проводников обмоток статоров АД рудничного исполнения применяют плёнкосинтокартон, электронит, лакотканеслюдапласт с классами нагревостойкости F; H, предельно допустимые температуры нагрева, которых составляют, соответственно, 155 °С и 180 °С, что согласуется с требованиями защиты изоляции этих проводников от механических и тепловых повреждений в процессе эксплуатации.

Конструкция отсека кабельного ввода рудничного АД выполняется в соответствии с требованиями государственных стандартов по устройству и эксплуатации рудничного взрывозащищённого электрооборудования [64, 65, 66] и содержит, в связи с этим, ряд технических решений, исключающих возможность контакта фазного проводника кабеля электропитания с металлическими элементами корпуса электродвигателя (Рисунок 2.2, Рисунок 2.3) [67]. Эти технические решения должны удовлетворять требованиям к размерам отсеков кабельных вводов АД, требованиям к размерам и трекинговости изоляционных корпусов проходных контактов, к устройствам крепления и фиксации кабелей электропитания в корпусах кабельных вводов (позиции 3, 10,

11, 12 рисунка 2.2). Кроме этого, в процессе изготовления на внутренние поверхности отсеков кабельных вводов могут быть нанесены полимерные электроизоляционные покрытия.

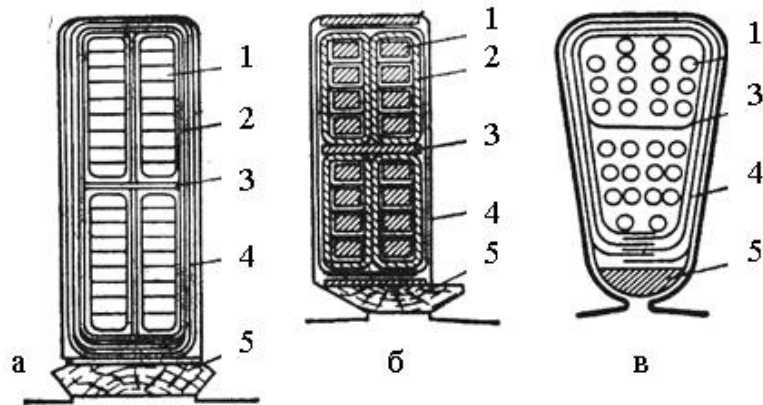


Рисунок 2.1 – Варианты заполнения паза статора АД проводниками фазной обмотки: а – открытый паз, б – полуоткрытый паз, в – полузакрытый паз; 1- проводники обмотки статора, 2 - изоляция слоя, 3 – межслойная изоляция, 4 – изоляция паза, 5 – клин уплотняющий

С учётом особенностей конструкции АД в рудничном взрывозащищённом исполнении, показатели их отказов, обусловленных контактом фазного проводника с металлическим корпусом, находятся на уровне, меньшем показателя для АД общепромышленного назначения (2% от общего количества аварийных состояний).

В то же время, присоединение нефиксируемого по длине оголённого центрального провода кабеля электропитания к заземляющему болту в отсеке кабельных вводов силового рудничного коммутационного аппарата при наличии расположенных в непосредственной близости силовых проходных контактов, находящихся под потенциалами фаз сети, создаёт опасность потенциального контакта фазы сети с металлическим корпусом электроустановки (Рисунок 2.4).

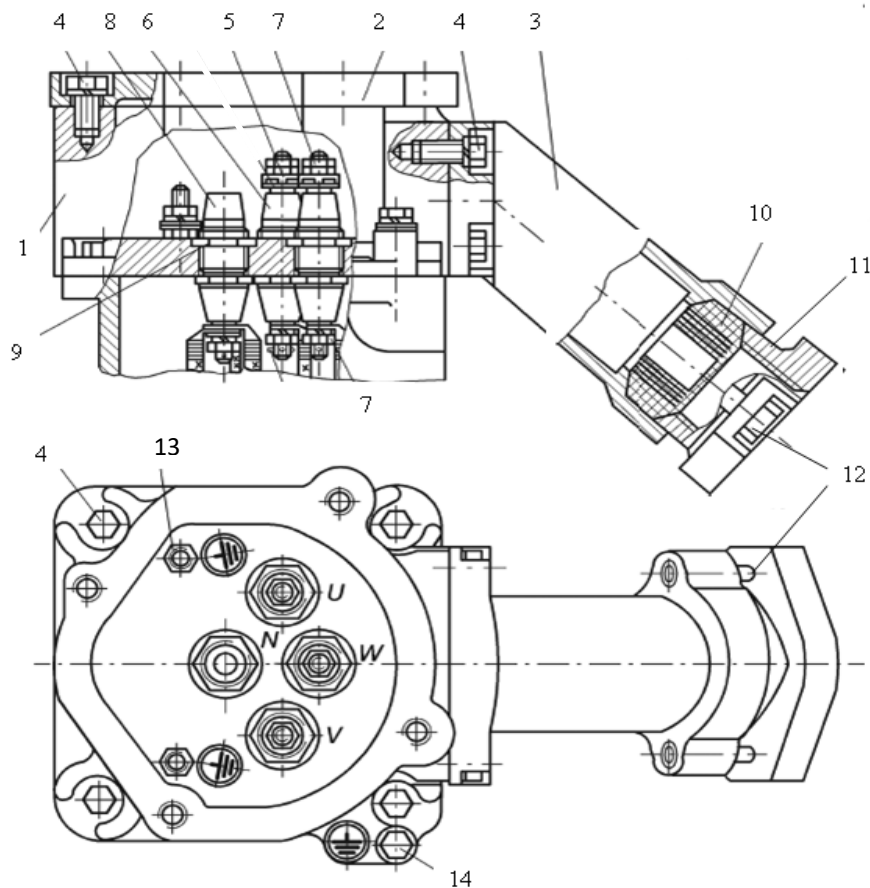


Рисунок 2.2 – Структурные компоненты отсека кабельного ввода асинхронного двигателя в рудничном взрывозащищённом исполнении: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – кабельный ввод; 4 – болт; 5 – силовые проходные зажимы (фаз U; W; V) в изоляционном корпусе 6; 7 – гайка; 8 – проходной контакт (в изоляционном корпусе) соединения концов обмоток (N) статора; 9 – крепление проходного контакта 8; 10 - уплотнительное резиновое кольцо; 11 – уплотняющий фланец с болтом 12 крепления; 13, 14 – заземляющие болты

Следует отметить также, что защитный эффект от применения заземления корпуса электроустановки может быть достигнут при условии надёжного контакта (при минимальном активном сопротивлении) этого корпуса с заземлителем. В области эксплуатации силового электрооборудования известны технические решения, относящиеся к непрерывному контролю исправности элементов заземления корпусов электроустановок. Однако, в целом, они повышают сложность обустройства и эксплуатации СЭС. В соответствии со схемой (Рисунок 2.5) [68], присоединение корпуса электроустановки к элементам заземления осуществляется не в одной, а в двух точках. Схема содержит источник

оперативного тока (трансформатор) и исполнительный релейный элемент. На отечественных горных предприятиях такой автоматический контроль не предусмотрен, что упрощает структуру СЭС, но не гарантирует эффективность выполнения защитной функции.

В то же время, в области эксплуатации силового рудничного электрооборудования на зарубежных горных предприятиях [69] известно применение силовых трёхжильных кабелей, не содержащих заземляющий провод, либо содержащих провод заземления, покрытый изоляцией и удалённый в структуре кабеля от его центра, что снижет составляющую ёмкостной проводимости, формируемой при присоединении этого провода к заземлению.

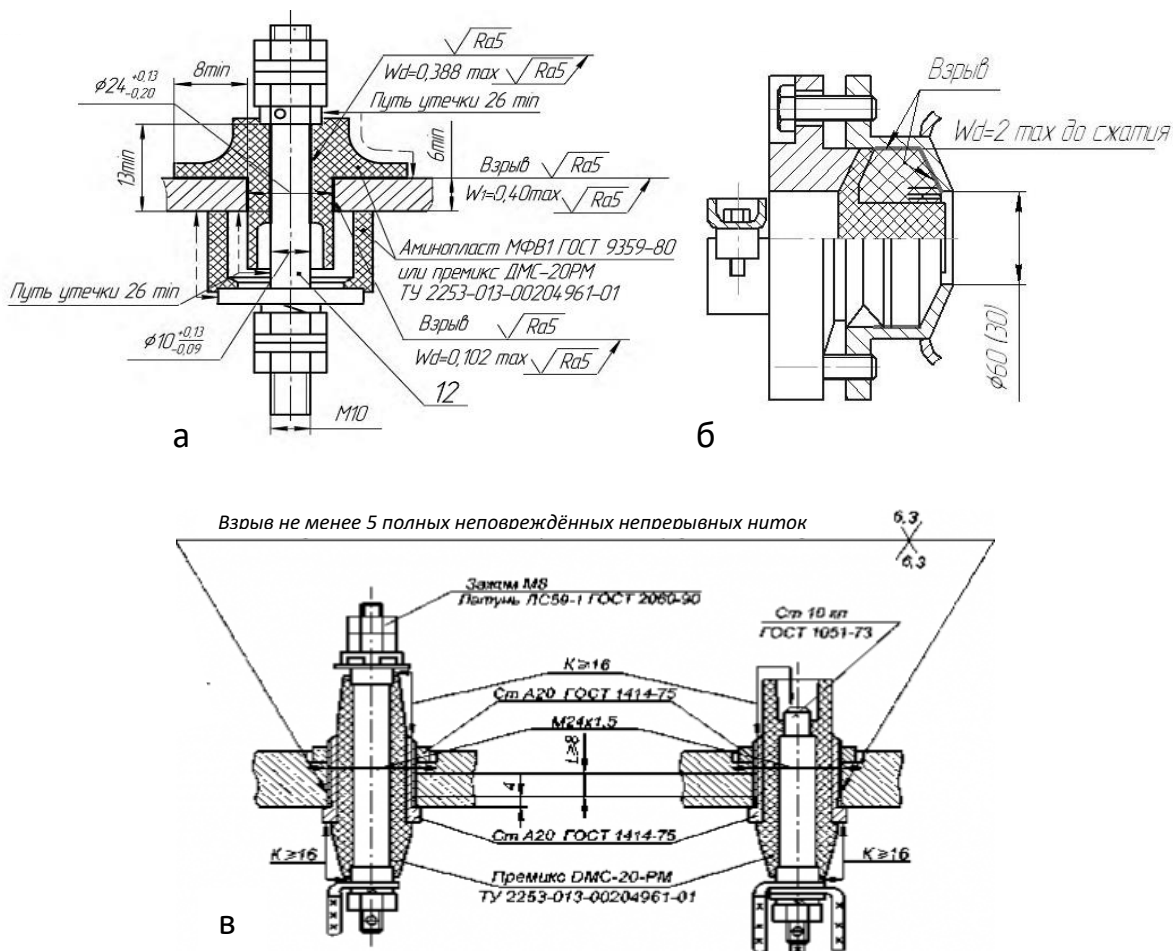


Рисунок 2.3 – Варианты конструкции силовых проходных зажимов рудничных: коммутационных аппаратов (а) и электродвигателей (в); устройство силового кабельного ввода (б) рудничной электроустановки

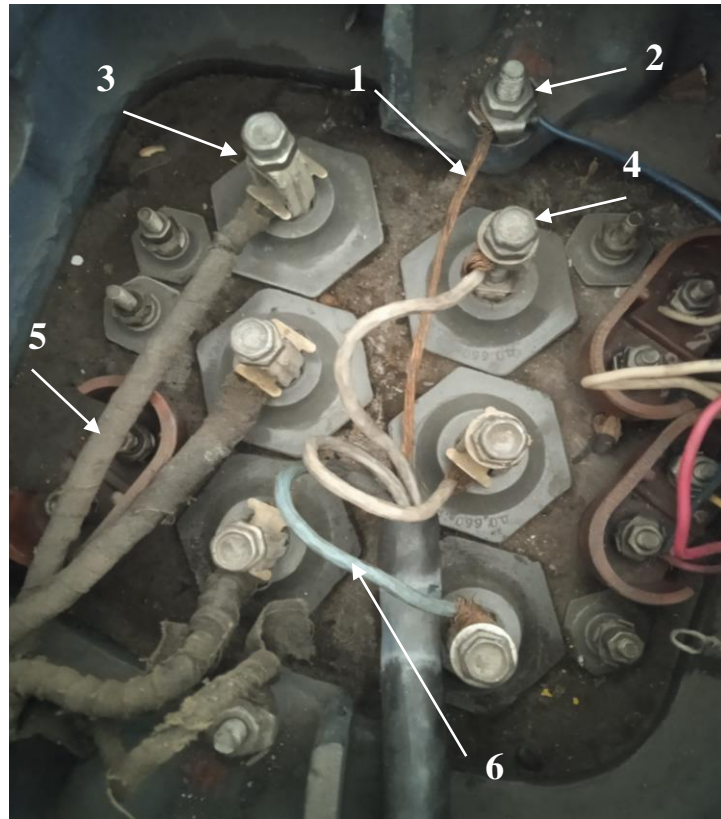


Рисунок 2.4 – Пример присоединения ЦП (1) кабеля к заземляющему болту (2) в отсеке кабельных вводов, создающего опасность контакта фазы сети с металлическим корпусом рудничной электроустановки: 3, 4 – силовые проходные зажимы ввода и вывода; 5, 6 – фазные проводники ввода, вывода

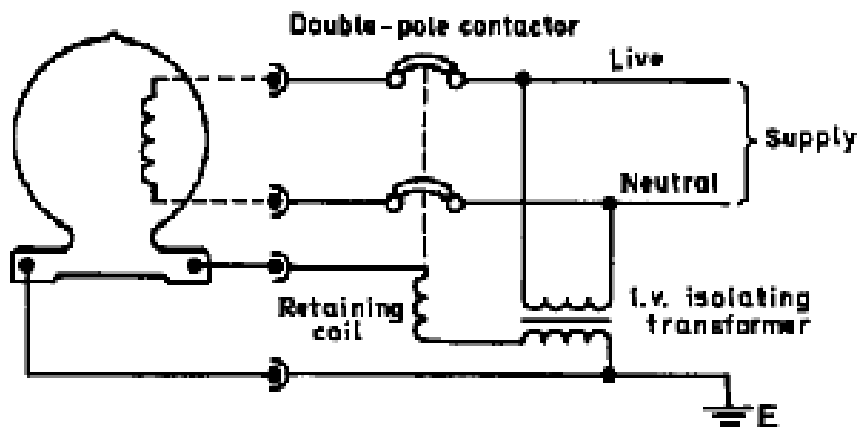


Рисунок 2.5 – Схема, поясняющая принцип автоматического контроля целостности цепи заземления металлического корпуса рудничной силовой электроустановки

Схемы выявления цепи «фаза - корпус АД», развивающие концептуальное техническое решение по рисунку 2.5, представлены на рисунке 2.6 [70]. Однако каждый из этих вариантов предполагает заземление корпуса АД и подключение аппаратной части к дополнительному заземлителю (ДЗ), что затрудняет их применение в структуре перемещаемых электроустановок. Устойчивость работы этих схем существенно зависит от соотношения сопротивлений цепей основного «З» и дополнительного «ДЗ» заземлителей. В то же время подобные технические решения свидетельствуют и о принципиальной возможности применения локальных средств выявления контакта фазы с корпусом электроустановки.

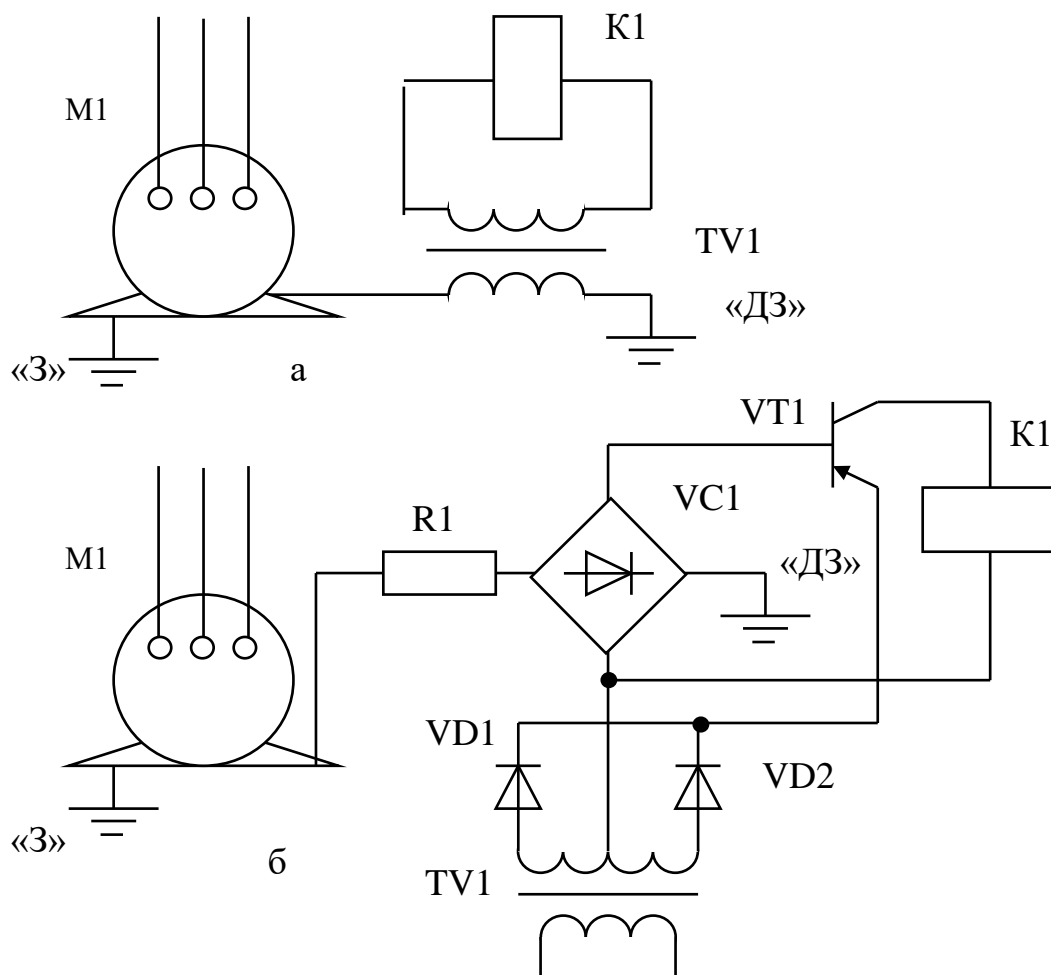


Рисунок 2.6 – Схемы выявления цепи «фаза - корпус АД»: а – с трансформаторной развязкой, б – с коммутацией реле ключевым транзистором

В области эксплуатации АД (преимущественно, высоковольтных электрических машин высокого уровня мощности) известно применение способа

защиты от закорачивания на землю обмотки статора (при заземлении корпуса АД) на основе измерения действующего значения тока нулевой последовательности и сравнения его с заданной уставкой [71]. Реализация такого способа связана с необходимостью точной настройки уставки срабатывания при относительно малых величинах сравниваемых токов. При этом измеряемые электрические параметры существенно зависят от величин ёмкостных токов, что усложняет схемные решения защиты. С учётом этого и весьма малой вероятности замыкания фазы сети на корпус АД техническая реализация данного способа в структуре СЭС участка шахты не предусмотрена.

Таким образом, такое маловероятное состояние непрерывно купируется заземлением корпуса АД присоединением к нему и заземлению ЦП кабеля электропитания, что формирует постоянно действующий (на 100%) и не устранимый существующими техническими средствами фактор электропоражения человека, выраженный ёмкостными проводимостями изоляции кабельной сети (между фазами и землёй) и усиливающийся по мере применения кабелей повышенных сечений и протяжённости.

Кроме этого, при присоединении неизолированного ЦП кабеля к заземляющему болту 13 (Рисунок 2.2) в отсеке кабельных вводов положение ЦП не фиксируется и он находится в непосредственной близости от проходных зажимов 5, что повышает вероятность контакта ЦП с фазными проводниками.

Изложенное позволяет сделать вывод о целесообразности принципиального изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части назначения и коммутации центральных проводов силовых гибких экранированных кабелей. В частности, центральные провода этих кабелей, не будучи подключенными к заземлениям, могут быть использованы как информационные каналы локальных средств контроля состояния изоляции кабелей электропитания асинхронных двигателей, непосредственно размещаемых в их структуре и представляющих собой структурные компоненты системы автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети.

Отделение ёмкостной проводимости между фазными и центральным

проводами кабелей электропитания АД от заземления (вследствие неподключения к заземлению ЦП этих кабелей) позволяет в значительной степени снизить ёмкостную составляющую тока в цепи утечки на землю, повышая тем самым безопасность эксплуатации шахтной участковой электрической сети.

Такой подход позволит также распространить схмотехнику участковых аппаратов автоматической защиты от утечек тока на землю на шахтные участковые электрические сети, оборудованные кабелями больших сечений и протяжённости, поскольку ёмкостные составляющие токов утечки на землю в них будут обусловлены не общей ёмкостью изоляции кабелей, а только частичной ёмкостью между фазными проводами кабелей и внешними поверхностями их оболочек. Контроль состояния кабелей электропитания и управление защитным отключением коммутационных аппаратов локальными техническими средствами, входящими в структуру АД, целесообразно дополнить блокированием включения силового присоединения с проводимостью цепи «фаза – корпус электроустановки», что позволит обеспечить селективность защитной функции.

2.2 Локализация контура заземления как способ повышения безопасности эксплуатации системы электроснабжения участка шахты

Обобщая результаты анализа специфики построения и функционирования системы электроснабжения участка шахты, можно сделать следующие выводы о наличии факторов, ограничивающих эффективность и повышающих опасность её эксплуатации и обусловленных применением способа заземления металлических корпусов электродвигателей, при использовании в этих целях центральных проводов кабелей электропитания (Рисунок 2.7). Таким образом, купирование маловероятного события - электротравмы человека вследствие его прикосновения к корпусу АД при появлении на нём потенциала фазы сети соряжено с формированием ряда постоянно действующих ограничительных и потенциально

опасных факторов, создающих в совокупности превосходящий отрицательный эффект, что может быть отнесено к области технического противоречия.

В контексте решения данного технического противоречия представляется целесообразным принципиально изменить концепцию построения и эксплуатации СЭС участка шахты [72]. Принципиальным отличием предлагаемого альтернативного концептуального решения является локализация контура заземления шахтной участковой электрической сети путём отделения от него центральных проводов силовых гибких экранированных кабелей и, следовательно, неприсоединения к заземлению металлических корпусов АД электропотребителей [73]. Поскольку переходное сопротивление между этими корпусами АД и почвой может принимать значение в широком диапазоне величин, структура асинхронных двигателей должна быть дополнена автономно действующими средствами контроля состояния изоляции кабелей электропитания и управления защитным отключением соответствующего силового присоединения. Будучи изолированным от заземлителей, ЦП кабелей электропитания в этом случае могут выполнять функцию проводников информационных сигналов между АД и силовыми коммутационными аппаратами.

Таким образом, в отличие от действующих подходов к построению системы электроснабжения участка шахты, в соответствии с альтернативной концепцией в структуре шахтного участкового электротехнического комплекса должна быть предусмотрена система автоматического защитного отключения силовых присоединений, предусматривающая контроль их технического состояния и управление защитным отключением как техническими средствами со стороны участковой КТП, так и локальными техническими средствами со стороны АД электропотребителей (Рисунок 2.8). В этом случае концептуальное решение в части формирования команды управления отключением контактора пускателя состоит в реакции на ток в цепи катушки исполнительного реле при её подключении между объектом контроля и фазами сети (посредством диодной схемы присоединения).



Рисунок 2.7 - Структура значимых факторов, обусловленных использованием центральных проводов кабелей электропитания в качестве заземляющих при эксплуатации электрической сети участка шахты

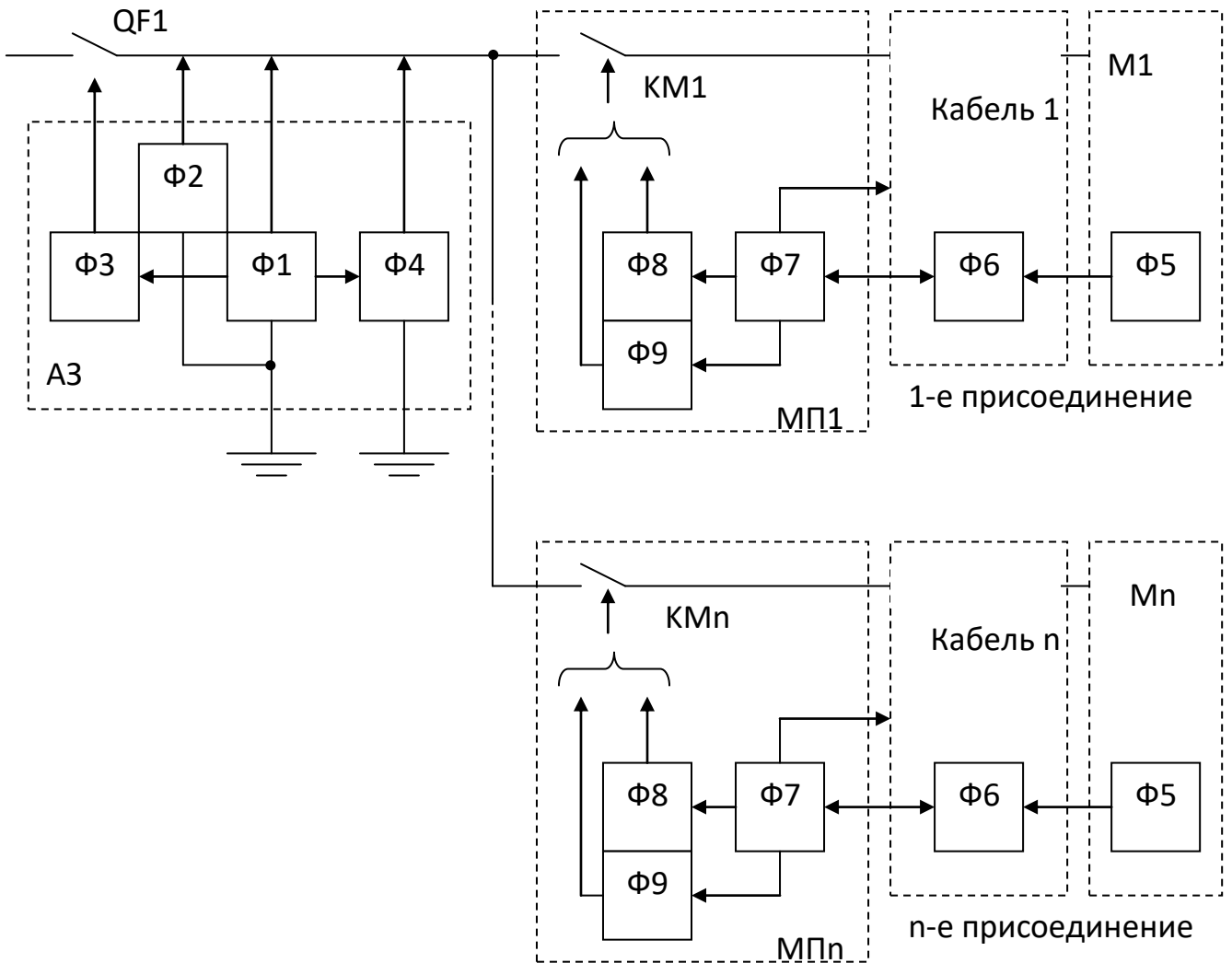


Рисунок 2.8 - Структура распределения функций компонентов системы автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети: АЗ - аппарат защиты от утечек тока на землю, МП - магнитный пускатель, КМ - контактор, QF1 - автоматический выключатель КТП

В условиях неподключения к заземлению ЦП кабелей электропитания, что обусловлено необходимостью частичного подавления электропоражающего фактора создаваемого ёмкостными прооводимостями изоляции, это позволит сохранить защитную функцию, выполняемую в настоящее время заземлением металлических корпусов АД электропотребителей, при этом, реализовать её на более высоком техническом уровне.

В соответствии с предлагаемой альтернативной концепцией построения системы электроснабжения участка шахты сохраняются функции применяемой в настоящее время и действующей со стороны КТП защиты от утечек тока на землю (АЗ):

- Ф1 – выявление цепи утечки (повышенной электрической проводимости) между фазой сети и землёй;
- Ф2 – частичная компенсация ёмкостного тока утечки (при наличии компенсатора в структуре АЗ);
- Ф3 – управление отключением автоматического выключателя КТП;
- Ф4 – замыкание на землю повреждённой фазы в процессе отключения автоматического выключателя КТП по команде АЗ.

В то же время, дополнительно вводятся защитные функции, формируемые локальными, действующими со стороны АД электропотребителей, средствами контроля и управления отключением силовых присоединений:

- Ф5 – выявление контакта фазного проводника с металлическим корпусом АД;
- Ф6 – передача информационного сигнала на схему магнитного пускателя посредством изолированного от заземления ЦП кабеля электропитания. Ф5 + Ф6 - имитация контакта фазного проводника с ЦП кабеля электропитания АД;
- Ф7 – выявление контакта фазного проводника с ЦП кабеля электропитания АД;
- Ф8 – управление отключением контактора магнитного пускателя;
- Ф9 – блокирование включения контактора магнитного пускателя в случае неустранения контакта фазного проводника с корпусом АД, либо с ЦП кабеля электропитания АД.

В совокупности и последовательности выполнения функции Ф5 - Ф9 представляют собой релейную функцию, которая заключается в автоматическом выявлении повреждённого элемента с последующей его локализацией.

В качестве дополнительной функции, повышающей удобство эксплуатации системы электроснабжения участка шахты, в условиях неприсоединения к заземлению ЦП кабеля электропитания (асинхронного двигателя) может быть реализован способ автоматического выявления места его повреждения.

Таким образом, реализация дополнительных защитных функций совместно с функциями аппарата защиты от утечек тока на землю представляет собой комплексное решение задачи защиты человека от поражения электрическим током техническими средствами, представляющими собой не отдельное устройство, а систему автоматического защитного отключения.

Рассмотрению подлежит вопрос обоснования структуры и параметров технического решения в области выявления касания фазным проводником сети металлического корпуса АД без заземления последнего и неприсоединения, в связи с этим, к заземлению ЦП кабеля электропитания.

Задача выявления (в автоматическом режиме) контакта фазы электрической сети с незаземлённым металлическим корпусом АД должна быть решена техническим средством, локализованным непосредственно в структуре самого АД. Поскольку контакт фазного проводника с металлическим корпусом АД представляет собой электрическую цепь малого активного сопротивления ($R_{ф-к} \approx 0$, Ом), структура измерительной цепи локализованного в АД защитного устройства при подключении последовательно с этой электрической цепью должна создавать контур протекания тока, что позволит сформировать информационный сигнал. При этом измерительная цепь в штатных условиях эксплуатации системы электроснабжения не должна нарушать режим изолированной нейтрали трансформатора и оказывать влияние на параметры оперативного тока участкового аппарата защиты (АЗ) от утечек тока на землю.

Этим допущениям и условиям соответствует схема, приведенная на (Рисунке 2.9) [8, с. 34-47, 9, с. 110-118]. Так, в соответствии со схем, измерительная цепь представлена соединёнными последовательно диодом VD1, конденсатором C1, обмоткой реле K1 с токоограничивающим резистором (применяется при необходимости) и подключена между металлическим корпусом АД и точкой соединения в «звезду» его обмоток статора (Рисунок 2.9а). В штатном режиме эксплуатации потенциал точки «звезда» равен нулю. При этом конденсатором C1 схема статора электрически отделяется от корпуса АД. Присоединение диода VD1 последовательно с конденсатором C1 создаёт эффект

протекания по измерительной цепи импульсов (полуволн) однополупериодного тока (затухающих по мере заряда конденсатора $C1$) при условии возникновения контакта фазы с металлическим корпусом АД.

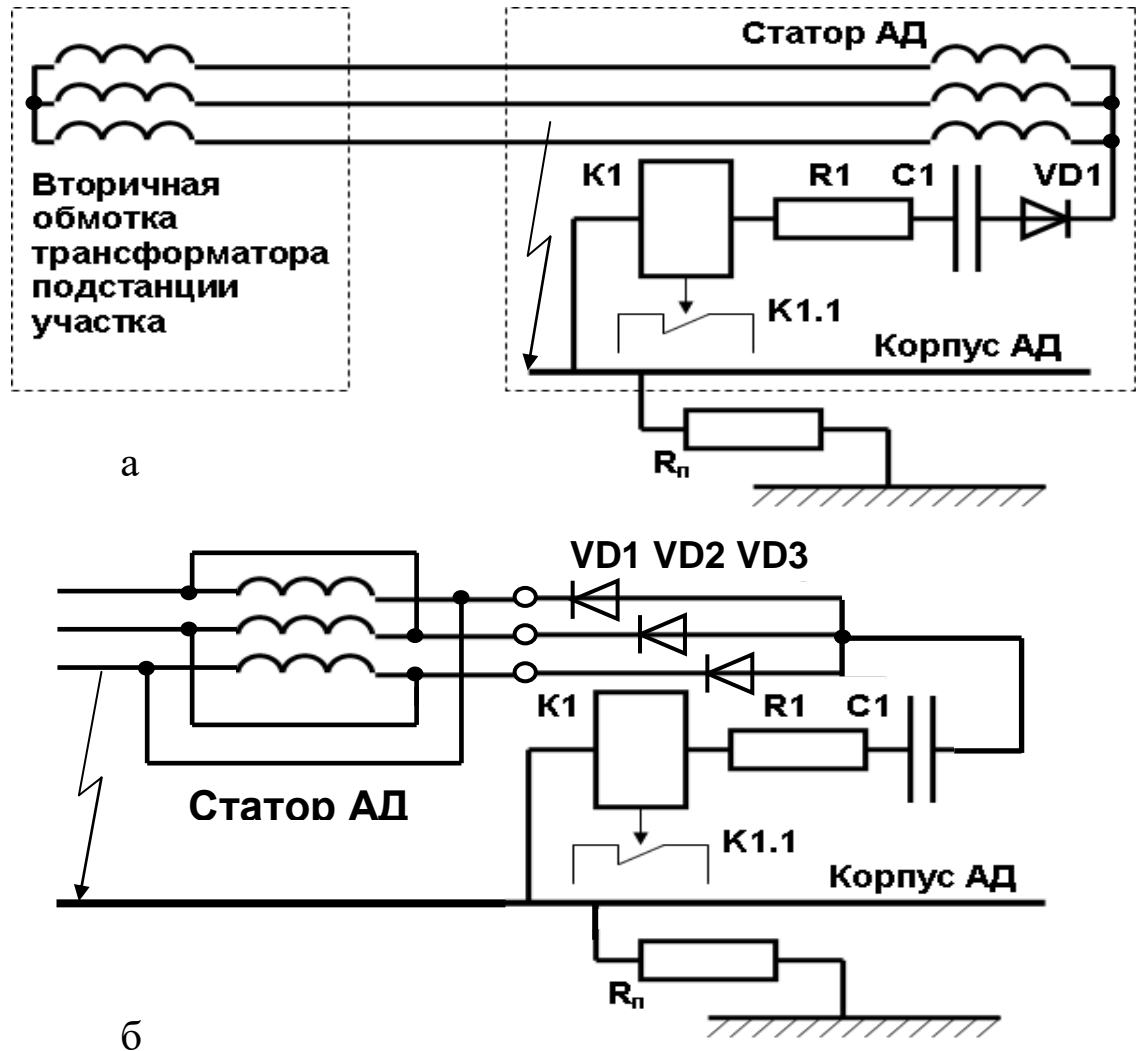


Рисунок 2.9 – Схемы, иллюстрирующие способ выявления контакта фазы с корпусом АД при соединении фазных обмоток статора АД по схеме «звезда» (а) и «треугольник» (б)

Выявление контакта фазы с металлическим корпусом АД на основе применения концептуальной схемы по рисунку 2.9а возможно и в случае, если фазные обмотки статора АД соединены по схеме «треугольник». Необходимым техническим решением здесь является дополнение схемы структурой присоединения измерительной цепи к фазам статора АД, имеющей точку нулевого потенциала и состоящей из индуктивностей, либо диодов $VD1$, $VD2$,

VD3 (Рисунок 2.9б). Полярность (направление импульсов) тока в измерительной цепи в данном случае не влияет на работоспособность устройства.

В случае применения технических средств выявления контакта фазы с металлическим корпусом АД (локализованных в структуре двигателя и исключающих заземление ЦП кабеля электропитания) переходное сопротивление R_{Π} между этим корпусом и землёй может быть не регламентировано

На рисунке 2.10 представлены осциллограммы (результаты компьютерного моделирования) напряжений на резисторе R1 (Рисунок 2.9а) сопротивления 1 кОм (ёмкость конденсатора C1 – 500 мкФ) измерительной цепи при контакте в момент t_1 фазы сети с корпусом АД. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

– при одинаковых импедансах изоляции между фазами сети и корпусом АД и отсутствии контакта фазы с корпусом ток в измерительной цепи отсутствует, что соответствует нормальному режиму работы электрооборудования;

– при появлении контакта между фазой и корпусом АД, либо между фазой и землёй (в предположении, что $R_{\Pi} = 0$) амплитуда информационного сигнала на резисторе R1 составляет: в сети линейного напряжения 660 В – 607 В (Рисунок 2.10а), в сети линейного напряжения 1140 В – 1000 В (Рисунок 2.10б), что достаточно для формирования команды на отключение силового присоединения и существенно выше параметров напряжения на резисторе R1 (78 В) до момента t_1 , зафиксированных при существенной разности импедансов изоляции между фазами сети и землёй (Рисунок 2.10г). При условии $R_{\Pi} > 0$ влияние этих импедансов изоляции на формирование информационного сигнала (напряжения) на резисторе R1 измерительной цепи будет ещё более низким;

– схемы (Рисунок 2.9) позволяют выявить касание человеком ($R_{\text{чел}} = R_{\text{ут}} = 1$ кОм) одновременно фазы сети и корпуса электродвигателя, либо фазы сети и земли при условии $R_{\Pi} \approx 0$ (Рисунок 2.10д), в том числе, в случае неодинаковости импедансов изоляции кабеля относительно земли. Схема может быть настроена таким образом, чтобы реагировать на контакт человека к фазе и земле при $R_{\Pi} > 0$. В то же время, функция защиты человека от электропоражения при его касании к

фазе сети и земле будет поддерживаться со стороны КТП аппаратом защиты от утечек тока на землю (АЗ).

Способ подключения измерительной цепи к фазам электрической сети через точку нулевого потенциала трёхфазной цепи присоединения может быть применён и для выявления контакта между фазным и центральным проводом силового гибкого кабеля. В этом случае целесообразна локализация измерительной цепи непосредственно в структуре магнитного пускателя (Рисунок 2.11), что упростит последующую функцию его защитного отключения.

Таким образом, предложенные концептуальные решения могут быть приняты в качестве основы при создании компонентов системы автоматического защитного отключения силового присоединения электрической сети участка шахты, реализующей релейную защитную функцию и локализуемых в структурах асинхронных двигателей электропотребителей и силовых коммутационных аппаратов (магнитных пускателей, станций управления). Простота схем структурных компонентов системы автоматического защитного отключения силового присоединения шахтной участковой электрической сети позволяет утверждать о сопоставимости параметров её надёжности с параметрами надёжности заземляющей сети участка шахты, с учётом компонентов заземления металлических корпусов АД. При этом, отказ от использования центральных проводов кабелей электропитания в качестве заземляющих жил позволяет существенно снизить ёмкостную проводимость между фазами сети и землёй и, тем самым, снизить риск электротравматизма персонала шахты.

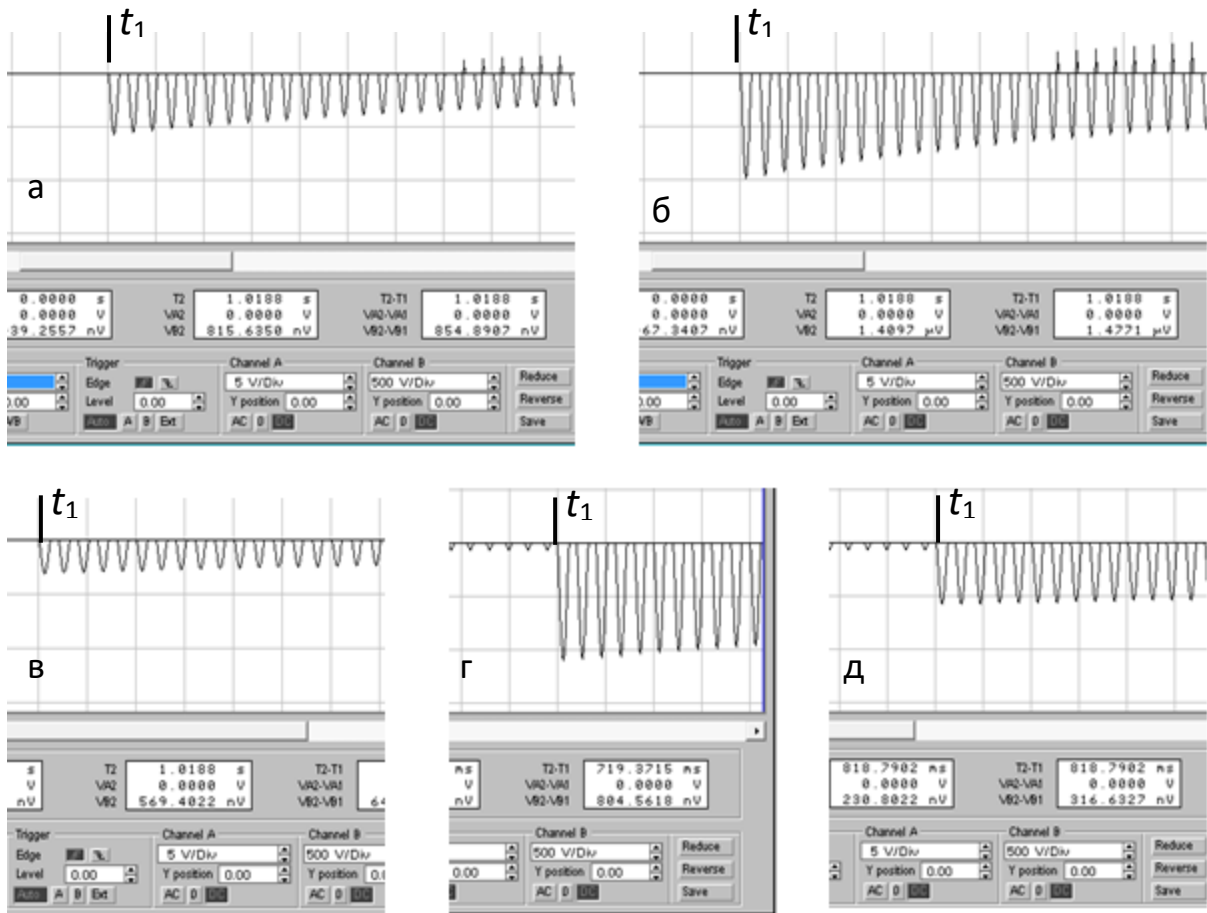
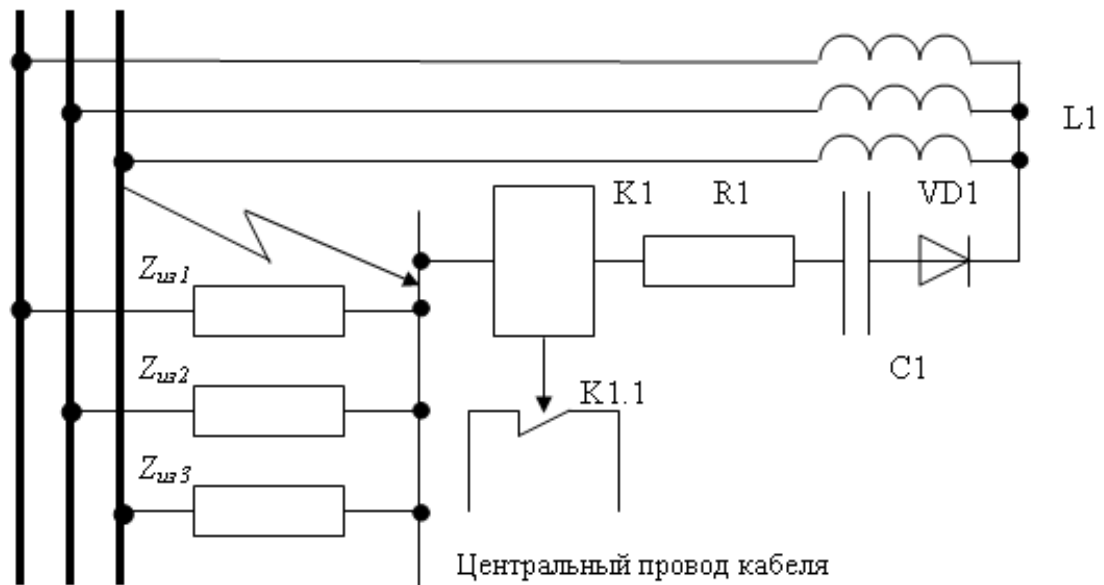


Рисунок 2.10 – Осциллограммы напряжений на резисторе R1 устройства выявления соединения фазы сети с корпусом АД (по рисунку 2.9а):
 а, в – линейное напряжение сети 660 В; б, г, д – линейное напряжение сети 1140 В; а, б, в – импедансы изоляции кабеля между 1-й, 2-й, 3-й фазами и землёй одинаковы; а, б, г – непосредственное соединение фазы с корпусом АД; в, д – соединение «фаза – земля – корпус двигателя» через активное сопротивление $R_{yt}=1$ кОм; г, д – параметры импедансов изоляции цепей «фаза – корпус АД»: 1-я фаза: $R_{\phi-3} = 100$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,2$ мкФ; 2-я фаза: $R_{\phi-3} = 120$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,5$ мкФ; 3-я фаза: $R_{\phi-3} = 60$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,3$ мкФ; масштаб напряжения 500 В/деление

На рисунке 2.12 представлена блок-схема алгоритма функционирования устройства защитного отключения незаземлённого рудничного асинхронного двигателя при локализации в его структуре средства выявления контакта фазы с металлическим корпусом. В блок-схеме алгоритма даны следующие обозначения:

- g_{A1-A2} – фактическая проводимость цепи «фаза - корпус АД»;
- $g_{A1-A2} \approx 0$ (См) - допустимая проводимость цепи «фаза - корпус АД»;
- $i_{БРУ}$ – оперативный ток, протекающий по обмотке реле КЗ;
- $i_{дон}$ – ток включения реле КЗ.



1-й, 2-й, 3-й фазные проводники кабеля на выходе пускателя

Рисунок 2.11 – Вариант реализации способа выявления повреждения изоляции кабеля, находящегося под напряжением техническим средством, локализованным в структуре пускателя

Алгоритмом также предусмотрена функция блокирования включения пускателя после защитного отключения силового присоединения, в котором возникла проводимость между фазой и корпусом электродвигателя (либо между фазным и центральным проводами кабеля электропитания АД), а также реакция на самоустранение контакта фазы с незаземлённым металлическим корпусом АД. С высокой долей вероятности эта функция будет реализована в силовых цепях остальных АД, отключение которых обусловлено наличием малых переходных сопротивлений ($R_{п}$) между корпусами двигателей и землёй и может иметь место в момент появления высокой проводимости между фазой и корпусом АД аварийного присоединения.

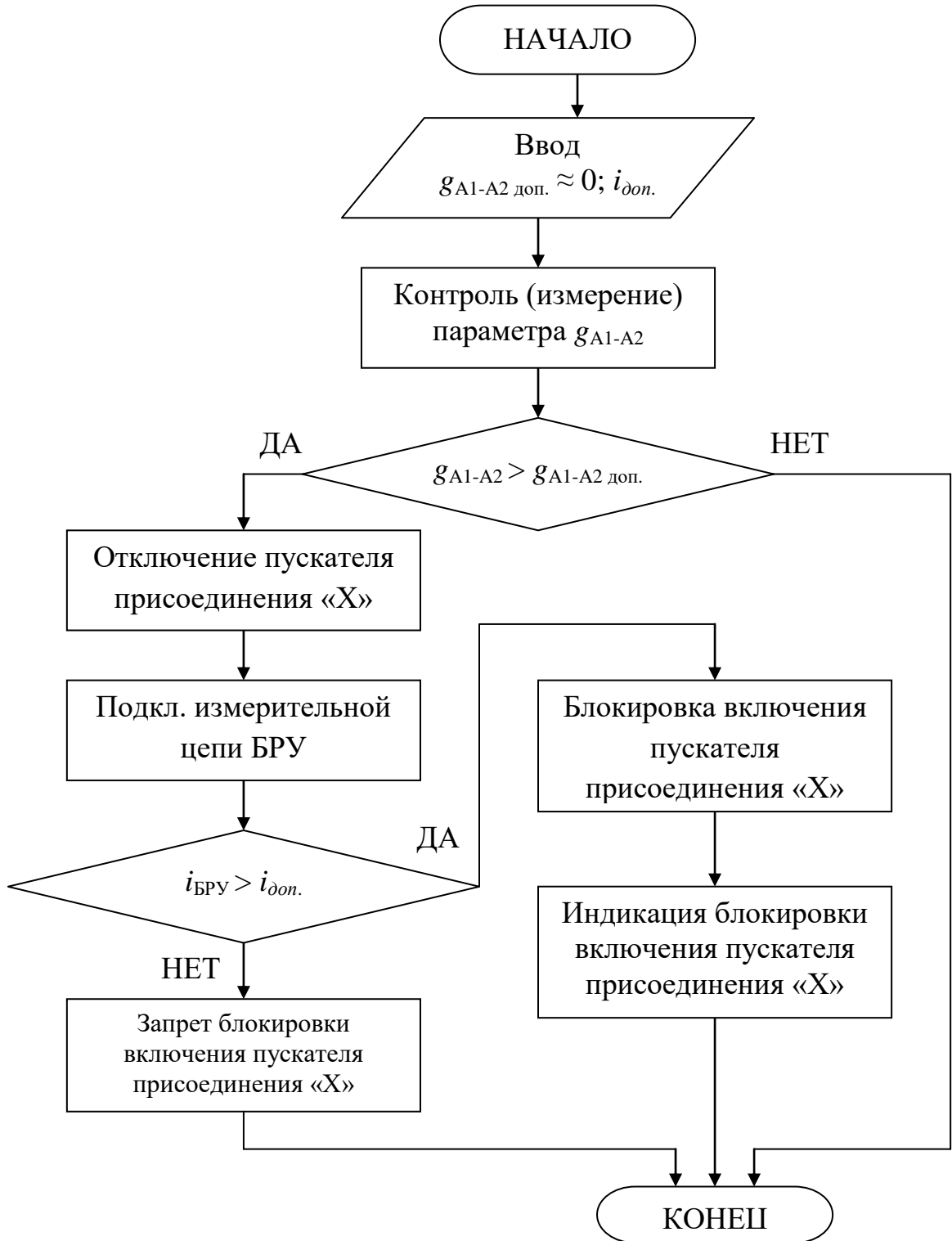


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритма автоматического защитного блокирующего отключения асинхронного двигателя при отсутствии заземления его металлического корпуса

2.3 Обоснование способа определения места повреждения шахтного гибкого кабеля

В условиях эксплуатации разветвлённых и протяжённых кабельных линий в системах электроснабжения участков шахт, в случае повреждения изоляции кабеля, практическую актуальность приобретает применение методов и средств ускорения поиска места повреждения.

Известные методы выявления места повреждения кабеля промышленной электросети (методы колебательного разряда, индукционный, ёмкостной, акустический, импульсный) реализуются сложными устройствами, схемы которых не согласуются с условиями использования в составе рудничного силового взрывозащищённого электрооборудования [74]. В то же время, петлевой метод [75], предполагающий использование дополнительного проводника в структуре кабеля при построении схемы измеряемых электрических компонентов, включающей фазный провод от источника питания до места повреждения кабеля и дополнительный проводник, может служить прототипом при разработке технического средства определения места повреждения изоляции кабеля, адаптированного к условиям применения в структуре рудничных электротехнических комплексов. Как следует из [76], в качестве причины возгорания шахтных гибких экранированных кабелей более 40% случаев составляют междуфазные короткие замыкания вследствие повреждения изоляции их силовых жил (как следствие сдавливания кабелей, либо как результат разрушения их оболочек внешними предметами).

Процесс повреждения фазы шахтного гибкого экранированного кабеля представляет собой контакт его фазного провода в месте повреждения с электропроводящими экранами изоляции фазных проводов, охватывающих по всей длине кабеля его ЦП. Активное сопротивление экрана из полупроводящей резины в зависимости от сечения жилы находится в пределах $0,5 \div 1,5$ кОм/км длины и также может быть представлено суммой сопротивлений элементарных отрезков ($R_{эп} = \sum r_{эpi}$) [77]. Эти отрезки, относящиеся к разным фазам,

представляются параллельными соединениями при таком же параллельном подключении к элементарным отрезкам (сопротивления $r_{эni}$) ЦП (Рисунок 2.13).

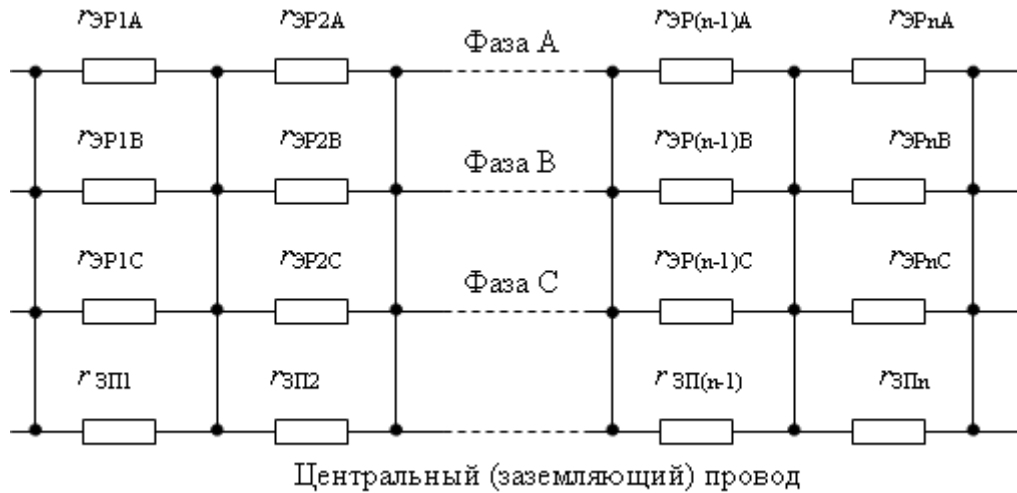


Рисунок 2.13 – Схемная интерпретация соединения элементарных отрезков экранов изоляции фазных проводов шахтного гибкого экранированного кабеля и его центрального провода

Применение петлевого метода состоит в создании и балансировке моста сопротивлений (Рисунок 2.14), содержащего, помимо резисторов R_1 , R_2 , сопротивления (представленные резисторами) участков $R_{4.1}$ (до точки «D» повреждения), $R_{4.2}$ (после точки «D» повреждения) и неповрежденной R_3 фазных проводов кабеля.



Рисунок 2.14 – Схема, иллюстрирующая концепцию петлевого метода определения места (точка «D») повреждения изоляции фазы кабеля

Вариант реализации петлевого метода определения места повреждения изоляции фазы кабеля (шахтный гибкий экранированный кабель) представлен схемой (Рисунок 2.15). В соответствии с этой схемой, после защитного отключения коммутационного аппарата SA1 контакторами К1; К2; К3 выходное напряжение трансформатора TV2 поочерёдно и кратковременно подаётся на фазы «А», «В»; «С» кабельного присоединения. Конечные точки фаз кабеля на время данной измерительной операции должны быть соединены между собой (контакты К5 – К7), либо подсоединены к трёхфазной нагрузке (статор АД потребителя).

В случае повреждения изоляции (фаза «С») ток в цепи датчика тока ТА будет определяться отношением выходного напряжения трансформатора TV2 к импедансу фазного проводника, составляющую нагрузку этого трансформатора на интервале включенного состояния соответствующего ключа (К1; К2, либо К3) и будут составлять:

- включен контакт К1

$$I_{TA(A)} = U_{TV2} / \text{sqr} \left(\left(r_{k(A)} + r_{k(C)2} + R_{ym} \right)^2 + \left(x_{k(A)} + x_{k(C)2} \right)^2 \right) = U_{TV2} / Z_{A-C2} \quad , \quad (2.1)$$

- включен контакт К2

$$I_{TA(B)} = U_{TV2} / \text{sqr} \left(\left(r_{k(B)} + r_{k(C)2} + R_{ym} \right)^2 + \left(x_{k(B)} + x_{k(C)2} \right)^2 \right) = U_{TV2} / Z_{B-C2} \quad , \quad (2.2)$$

- включен контакт К3

$$I_{TA(C)} = U_{TV2} / \text{sqr} \left(\left(r_{k(C)1} + R_{ym} \right)^2 + x_{k(C)1}^2 \right) = U_{TV2} / Z_{C1} \quad . \quad (2.3)$$

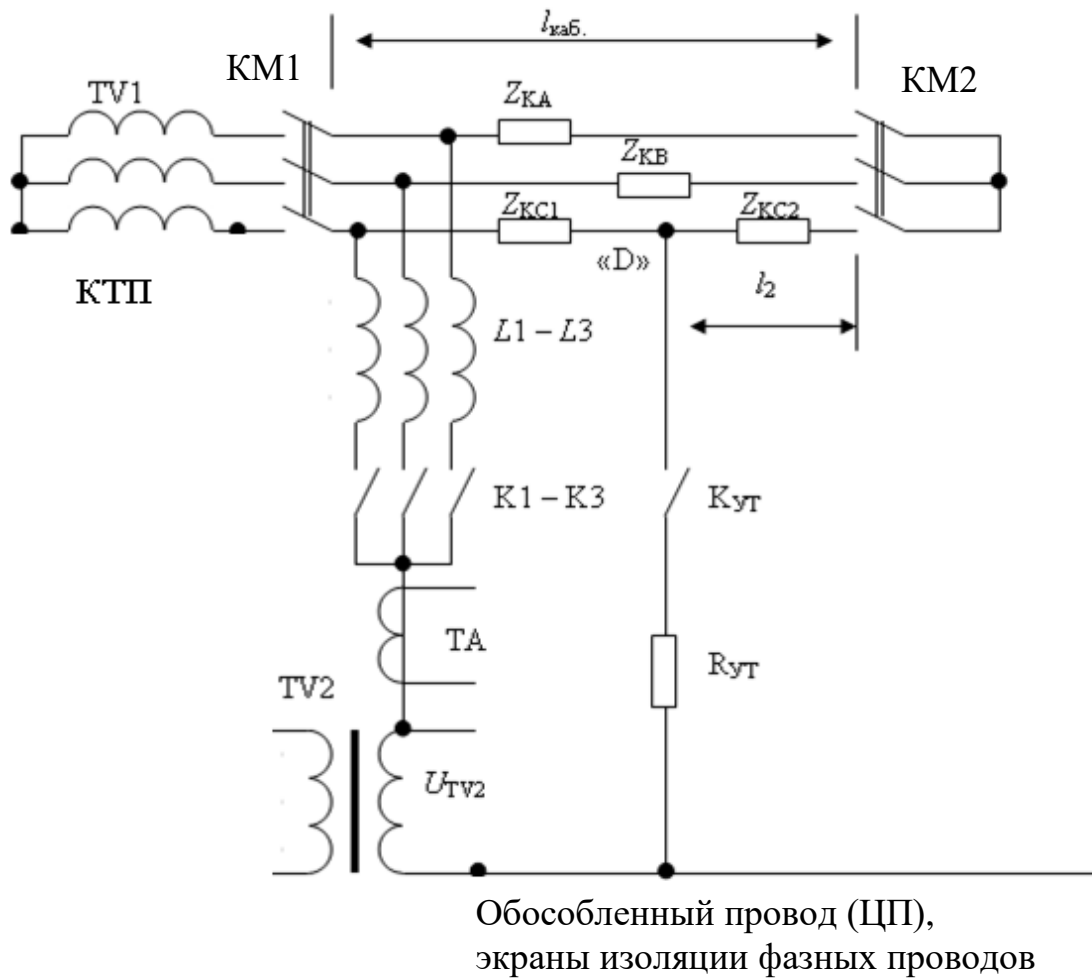


Рисунок 2.15 – Схема, иллюстрирующая процесс контроля момента и выявления места повреждения изоляции шахтного гибкого экранированного кабеля

При механическом повреждении проводником фазы резиновой изоляции силового фазного провода кабеля сопротивление утечки $R_{ут} \approx 0$. С учётом этого, упрощаются выражения 2.1, 2.2, 2.3. В дальнейшем, на основании данных о величине токов в цепи датчика тока ТА может быть определено место повреждения изоляции жилы кабеля, например, в виде отношения длины участка провода от точки «D» повреждения до конца кабеля к общей длине кабеля:

$$L_2 / L_{каб} = Z_{КС2} / Z_{КА} = Z_{КС2} / Z_{КВ} \quad , \quad (2.4)$$

что поясняется следующими соотношениями:

$$I_{TA(A)} / I_{TA(C)} = Z_{kC1} / (Z_{kA} + Z_{kC2}) = (Z_{kA} - Z_{kC2}) / (Z_{kA} + Z_{kC2}) , \quad (2.5)$$

откуда

$$I_{TA(A)} (Z_{kA} + Z_{kC2}) = I_{TA(C)} (Z_{kA} - Z_{kC2}) , \quad (2.6)$$

$$Z_{kC2} (I_{TA(A)} + I_{TA(C)}) = Z_{kA} (I_{TA(C)} - I_{TA(A)}) , \quad (2.7)$$

$$Z_{kC2} / Z_{kA} = (I_{TA(C)} - I_{TA(A)}) / (I_{TA(A)} + I_{TA(C)}) . \quad (2.8)$$

Технически процесс определения места повреждения изоляции фазного провода кабеля применительно к схеме (Рисунок 2.15) представляет собой последовательное выполнение процедуры измерения токов $I_{TA(i)}$ в ветвях кабельного присоединения (частный случай описан выражениями (2.1 - 2.3)) и процедуры вычисления протяжённости ($L_1 = L_{каб} - L_2$) кабеля от коммутационного аппарата (магнитного пускателя) до места повреждения изоляции фазного провода, что иллюстрируется соответствующими блок-схемами алгоритмов (Рисунок 2.16, Рисунок 2.17).

В основе алгоритма по рисунку 2.17 лежит выявление максимальных значений суммы токов (Q) и разности по модулю токов (J) в паре ветвей кабельного присоединения, что соответствует выражению (2.8) и позволяет вычислить соотношение $L_2 / L_{каб}$, пропорциональное отношению импедансов этих ветвей. Рассмотренный процесс выявления места повреждения изоляции фазы кабеля может быть осуществлён, если центральный медный провод кабеля, имеющий контакт по всей длине с экранами силовых фазных проводов, выполненными из полупроводящей резины, использовать в качестве обособленного проводника, не выполняющего функцию заземления.

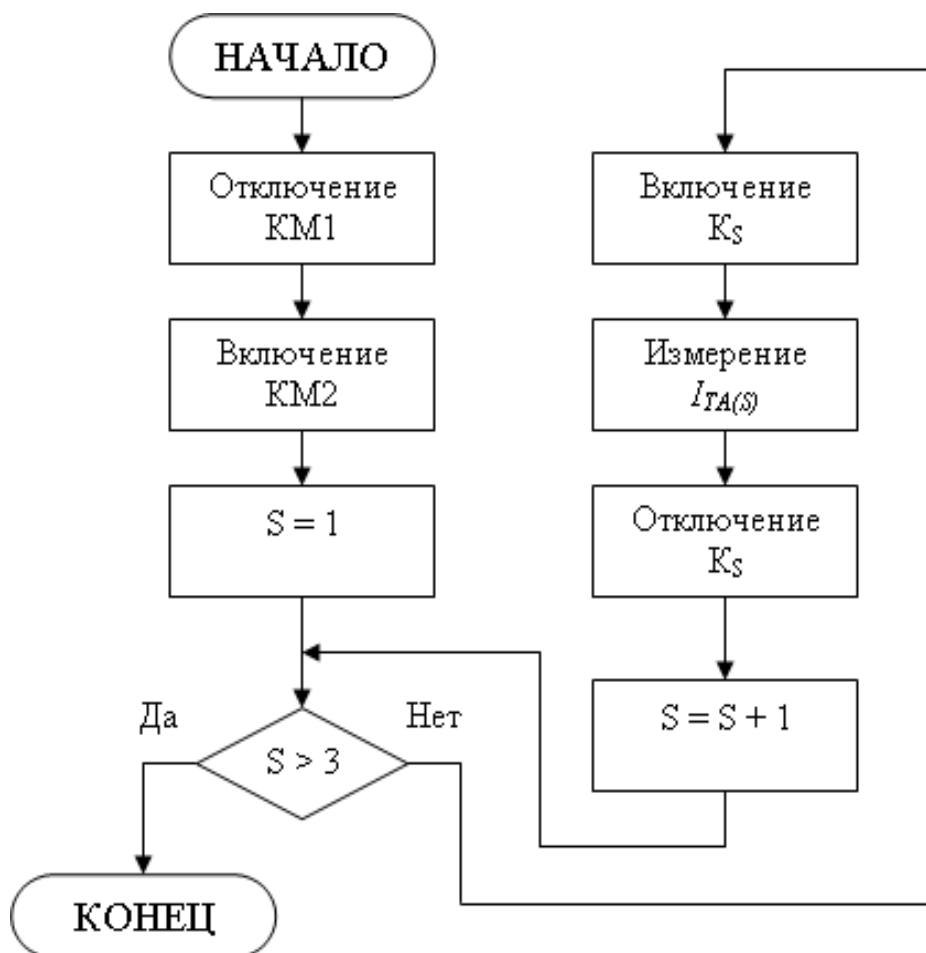


Рисунок 2.16 – Блок-схема алгоритма процесса измерения токов в ветвях кабельного присоединения

Таким образом, установлена принципиальная возможность выявления места повреждения изоляции фазного провода шахтного гибкого экранированного кабеля при условии использования в его структуре обособленного проводника на основе адаптации петлевого метода к применению в условиях эксплуатации силового рудничного электрооборудования

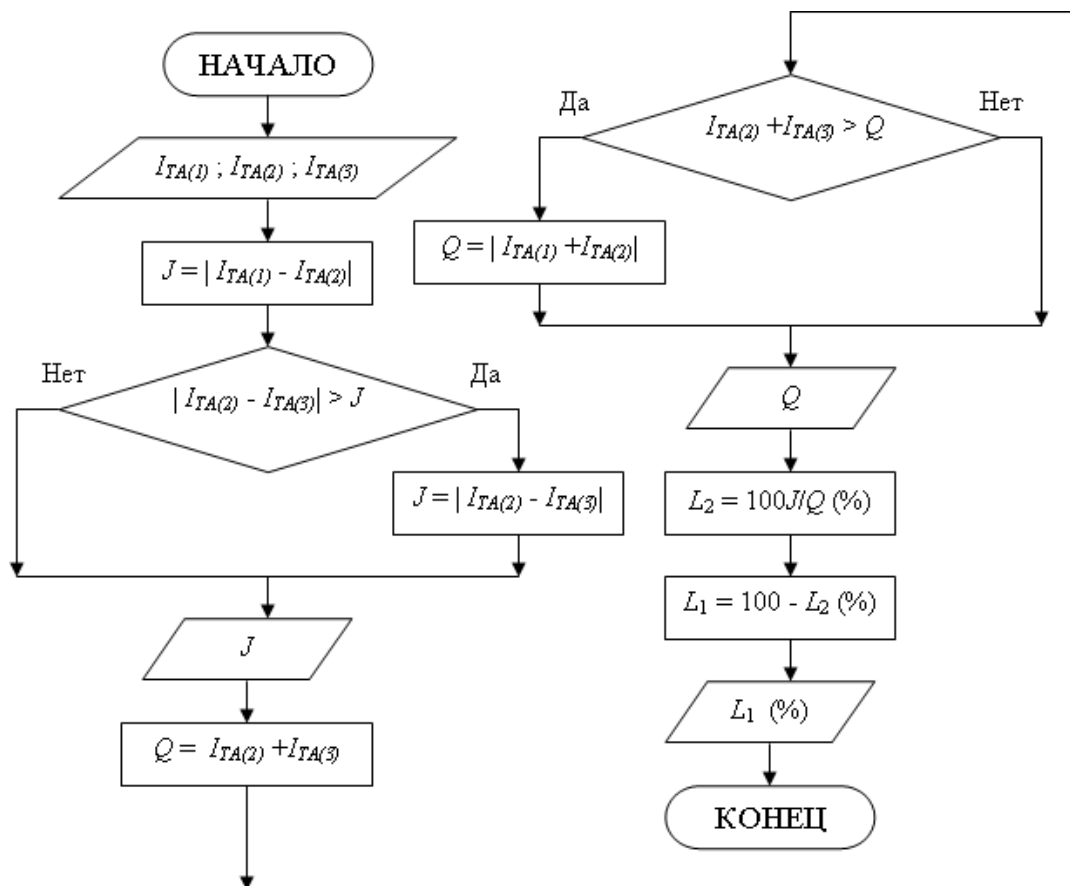


Рисунок 2.17 – Блок-схема алгоритма вычисления протяжённости L_1 (% от общей длины) кабеля от пускателя до места повреждения изоляции фазного провода

2.4 Управление коммутацией в цепи нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции как способ повышения эффективности защитного отключения электрической сети

Рассматриваемая концепция построения СЭС технологического участка шахты, в соответствии с которой исключается присоединение к заземлению центральных проводов шахтных экранированных гибких кабелей, создаёт потенциальную возможность реализации принципиально иного способа выявления повреждения изоляции фазных проводников и применительно к экранированным кабелям, предназначенным для стационарной прокладки от КТП к распределительным пунктам шахтных технологических участков (кабели марок ЭВТ, ГРШЭП, КШВЭБШв и т.п.) [78]. С этой целью структура КТП также

может быть дополнена R-C-VD – измерительной цепью между ЦП кабеля и нейтралью трёхфазной вторичной обмотки трансформатора (Рисунок 2.18). Данный способ отличается простотой технической реализации и эффективностью защитной функции.

На рисунке 2.19 представлены диаграммы формирования информационного сигнала - импульса напряжения на резисторе R (Рисунок 2.18) в момент появления проводимости $g=1/R_{ут}$ фазы (фаз) на центральный провод, полученные моделированием. Введены допущения: $R = 10$ кОм; $C = 1,5$ мкФ; $R_{ут} = 1,0$ кОм; исходные параметры изоляции каждой силовой жилы (фазного проводника) кабеля $R_{из} = 100$ кОм; $C_{из} = 0,5$ мкФ/фазу.

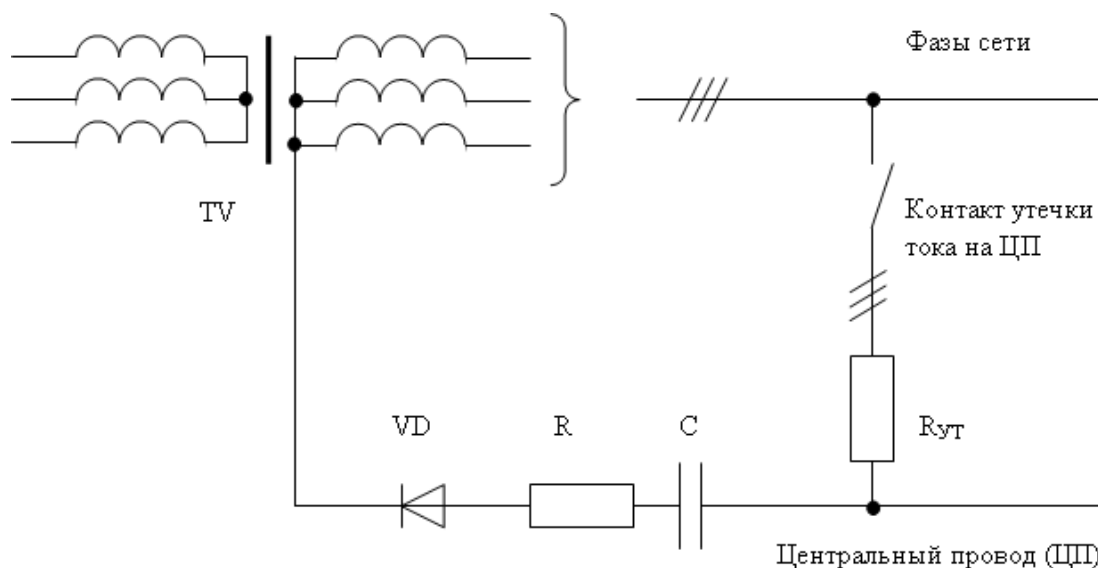


Рисунок 2.18 – Схема, иллюстрирующая концепцию выявления повреждения изоляции фазных проводников экранированного кабеля силового присоединения шахтной участковой КТП при использовании центрального провода кабеля в качестве изолированного от заземления информационного канала

Из анализа диаграмм (Рисунок 2.19) следует, что присоединение R-C-VD – цепи позволяет выявить факт появления повышенной проводимости $g=1/R_{ут}$ на центральный провод, в частности, при $R_{ут} = 1$ кОм, что соответствует сопротивлению тела человека. При этом амплитуды импульсов напряжения на резисторе R данной цепи – достаточны для приведения в действие исполнительного устройства защиты.

Появление цепей утечки тока с абсолютно одинаковыми проводимостями мгновенно с трёх фаз на ЦП схемой (Рисунок 2.18) выявлено не будет ввиду

формирования нулевого потенциала в точке соединения $R_{ут}$ с ЦП при нулевом потенциале нейтрали соединения в «звезду» вторичных обмоток трансформатора подстанции. Однако это крайне маловероятное состояние. В то же время, схема (Рисунок 2.18) позволяет выявить появление цепей утечки тока трёх фаз на центральный провод в предельно малом диапазоне интервалов времени появления этих цепей утечки (Рисунок 2.19в, Рисунок 2.19г). Схема (Рисунок 2.18) также позволяет выявить мгновенную (синхронную) утечку с трёх фаз на центральный провод, если имеет место даже незначительная разница в величинах сопротивлений утечки разных фаз (Рисунок 2.19д).

Соответствующий схеме (Рисунок 2.18) способ выявления повышенной проводимости фазы на ЦП кабеля представляет собой техническое решение, дублирующее функцию участкового аппарата защиты от утечек тока на землю в части реакции на возникновение цепи электрической проводимости: «фаза - экран - центральный провод кабеля», что повышает надёжность системы автоматического защитного отключения СЭС участка шахты.

Обесточивание силового присоединения КТП в случае повреждения изоляции фазного проводника отходящего кабеля может быть достигнуто отключением её автоматического выключателя. Однако инерционность срабатывания АВ типажного ряда А37ХХ (0,08 с) [79] обуславливает целесообразность поиска альтернативных технических решений, отличающихся бóльшим быстродействием (при условии их применения дополнительно к штатным исполнительным средствам защитного отключения).

Следует отметить, что закорачивание на центральный провод повреждённой фазы (как это реализуется схмотехникой аппаратов защиты от утечек тока на землю в форме закорачивания на землю повреждённой фазы) предполагает существенное усложнение устройства защиты (что нерационально) и не может быть использовано при одновременном повреждении изоляции (создании повышенной проводимости на ЦП) двух или трёх фаз. Положительный эффект может быть достигнут размыканием нейтрали соединённых в «звезду» вторичных фазных обмоток трансформатора КТП быстродействующими вакуумными

контакторами КМ1, КМ2 (Рисунок 2.20). В этом случае с целью ограничения токов, либо исключения перенапряжений в момент отключения контакторов в схему соединения вторичных обмоток трансформатора могут быть введены активные сопротивления R_1 ; R_2 ; R_3 , величины которых должны соответствовать критерию неперевышения тока в цепи утечки $R_{ут} = 1,0$ кОм длительно безопасного уровня – 25 мА ($R > 14,2$ кОм для сети линейного напряжения $U = 660$ В; $R > 25,4$ кОм для сети линейного напряжения $U = 1140$ В) и создавать напряжение на выходе вторичной обмотки трансформатора КТП и, соответственно, на трансформаторе, питающем функциональные узлы её распределительного устройства низкого напряжения, недостаточное для поддержания во включенном состоянии расцепителя минимального напряжения автоматического выключателя (СА).

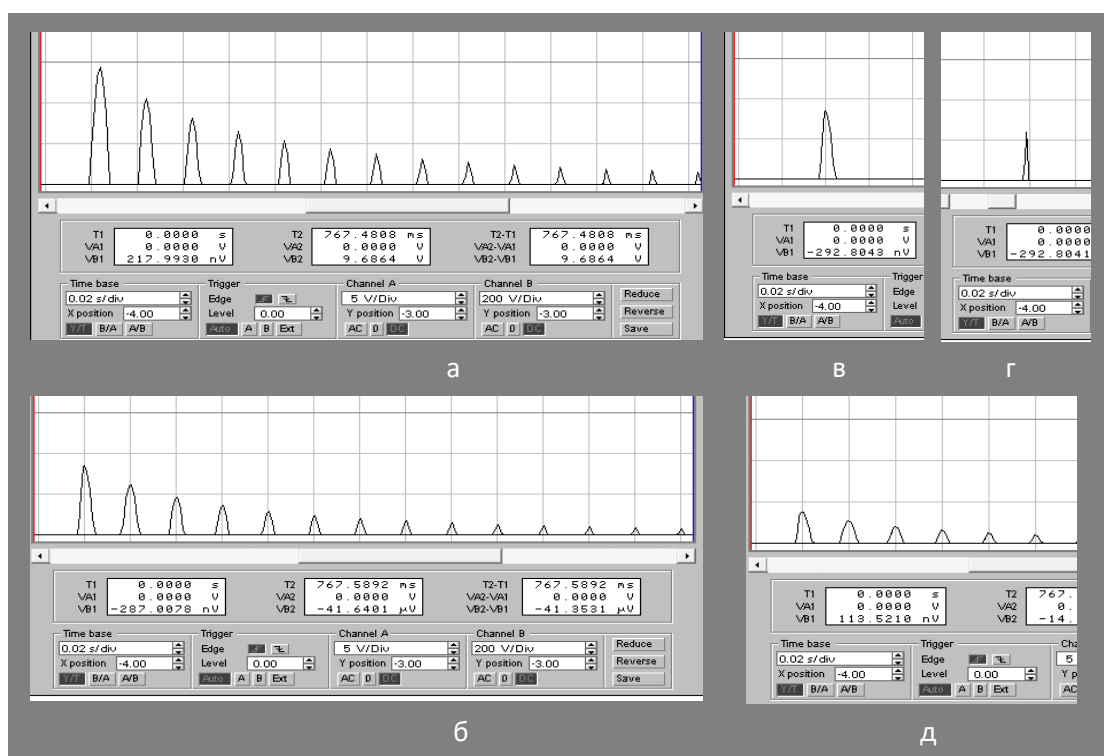


Рисунок 2.19 – Осциллограммы импульсов напряжения на резисторе измерительной R-C-VD – цепи (по Рисунок 2.15): а – возникновение утечки тока на ЦП с одной фазы ($R_{ут} = 1$ кОм); б – одновременное возникновение утечки с двух фаз на ЦП ($R_{ут} = 1$ кОм); в, г - одновременное возникновение утечки с двух фаз на ЦП ($R_{ут} = 1$ кОм) и спустя 0,01 с (в); 0,001 с (г) – возникновение утечки ($R_{ут} = 1$ кОм) на ЦП с третьей фазы; д - одновременное возникновение утечки на ЦП с двух фаз при $R_{ут} = 1$ кОм и с третьей фазы при $R_{ут} = 2$ кОм (масштаб напряжения 200 В/деление шкалы)

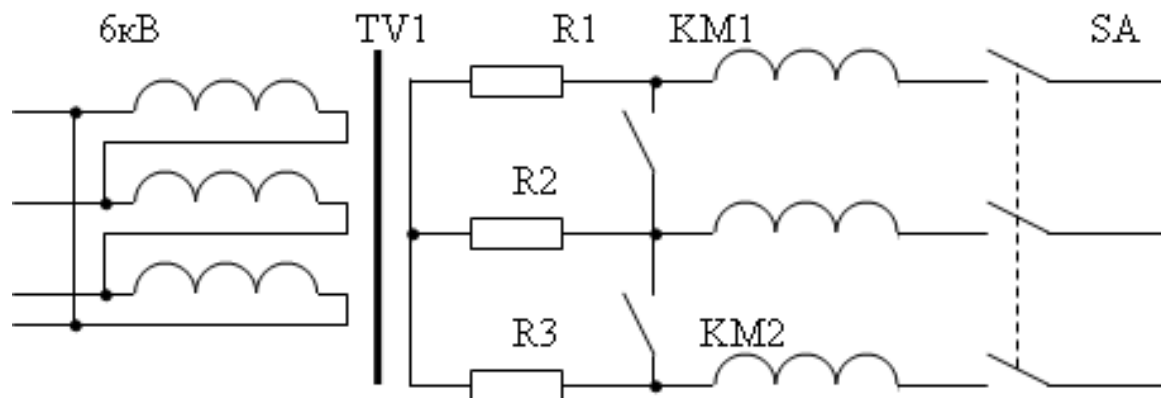


Рисунок 2.20 – Схема контакторной (KM1 - KM2) коммутации нейтрали вторичных фазных обмоток трансформатора подстанции участка шахты

Таким образом, условием функционирования трансформаторной подстанции будет включённое состояние контакторов KM1 и KM2 (Рисунок 2.20). Их отключение должно быть предусмотрено только по команде защиты от утечки тока с фазы на центральный провод, либо в случае обесточивания (отключения напряжения 6 кВ) со входа силового трансформатора подстанции.

В соответствии с техническими условиями эксплуатации вакуумного контактора типа SPVC, его включение осуществляется с использованием эффекта форсировки перемещения подвижных компонентов электромагнита [80]. С этой целью в схеме (Рисунок 2.21) предусматривается функциональный узел, состоящий из обмотки W2 напряжения 220 В трансформатора TV1, выпрямителя VC1 и сдвоенной кнопки «ПУСК» S1.1-S1.2 (применительно к одному однополюсному контактору). После включения контактора его замыкающий контакт SQ2 создаёт путь тока удержания электромагнитной системы - от выпрямителя VC2. Эффект возникновения утечки тока на ЦП кабеля сопровождается формированием импульса тока в измерительной R-C-VD - цепи и, следовательно, импульса напряжения на её резисторе R (Рисунок 2.16), что может быть использовано в качестве управляющего сигнала, приводящего к срабатыванию исполнительного реле (KS) защиты.

Применение реле в данном случае принципиально важно, поскольку защитное действие будет сопровождаться механическим разрывом цепи тока коммутации катушки YA вакуумного контактора К (контакт KS1), что является фактором обеспечения надёжности отработки защитной функции. Принципиально важным является то, что размыкающий контакт KS1 реле KS будет находиться в цепи коммутации относительно невысокого тока удержания вакуумного контактора (цепи его катушки YA), что расширяет диапазон доступных к применению типов быстродействующих промежуточных реле. Одним из возможных технических решений является применение (при подключении к измерительной R-C-VD - цепи по Рисунку 2.18) промежуточного реле РП-21-020-УХЛ4А [81], содержащего два размыкающих контакта. Это позволит одним реле одновременно воздействовать на отключение обоих вакуумных контакторов (KM1 и KM2 по Рисунку 2.20) в цепи нейтрали коммутации фазных вторичных обмоток трансформатора подстанции.

Согласно техническим характеристикам, коммутируемый ток контактов этого реле (6 А при напряжении 36 В постоянного тока и 2,5 А при напряжении 220 В переменного тока), согласуется с параметрами коммутации цепи катушки YA контактора типа SPVC. Нормируемое время срабатывания реле РП-21 в вариантах применения замыкающих, либо переключающих контактов не превышает 0,03 с. Следует полагать, что разъединение его размыкающих контактов будет начинаться в момент подачи тока в обмотку, то есть, совпадать с моментом формирования (переднего фронта) импульса напряжения на резисторе R-C-VD - измерительной цепи (Рисунок 2.18), что соответствует моменту появления повышенной проводимости между фазным и центральным проводами кабеля. Допуская инерционность срабатывания реле РП-21, возможно предположить, что с учётом собственного времени отключения вакуумного контактора SPVC, составляющего $0,007 \pm 0,002$ с, общая продолжительность размыкания нейтрали соединения в «звезду» фазных вторичных обмоток трансформатора КТП будет находиться в пределах $0,010 \text{ с} \div 0,012 \text{ с}$.

Эффективность предлагаемого способа защитного отключения сети

коммутацией нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции участка подтверждается результатами моделирования (Рисунок 2.22), где в основу расчётной схемы положена структура (Рисунок 2.20) с параметрами трансформатора подстанции ВСПП-1000 при фазном/линейном напряжении выхода, соответственно, 660/1140 В. Величины сопротивлений резисторов $R1 = R2 = R3 = 3 \text{ кОм}$; сеть участка – в «Состоянии -1», т.е., центральный провод кабеля заземлён; сопротивление утечки $R_{ут} = 1 \text{ кОм}$; активное сопротивление изоляции кабеля (между фазным проводником и землёй) $R_{из} = 60 \text{ кОм}$; отключение контакторов КМ1 и КМ1 – синхронное в момент времени t_1 . Исследование выполнено для кабелей марки КГЭШ с сечениями рабочих жил 25 мм^2 ; 35 мм^2 ; 50 мм^2 ; 70 мм^2 при длинах кабелей 200 м.

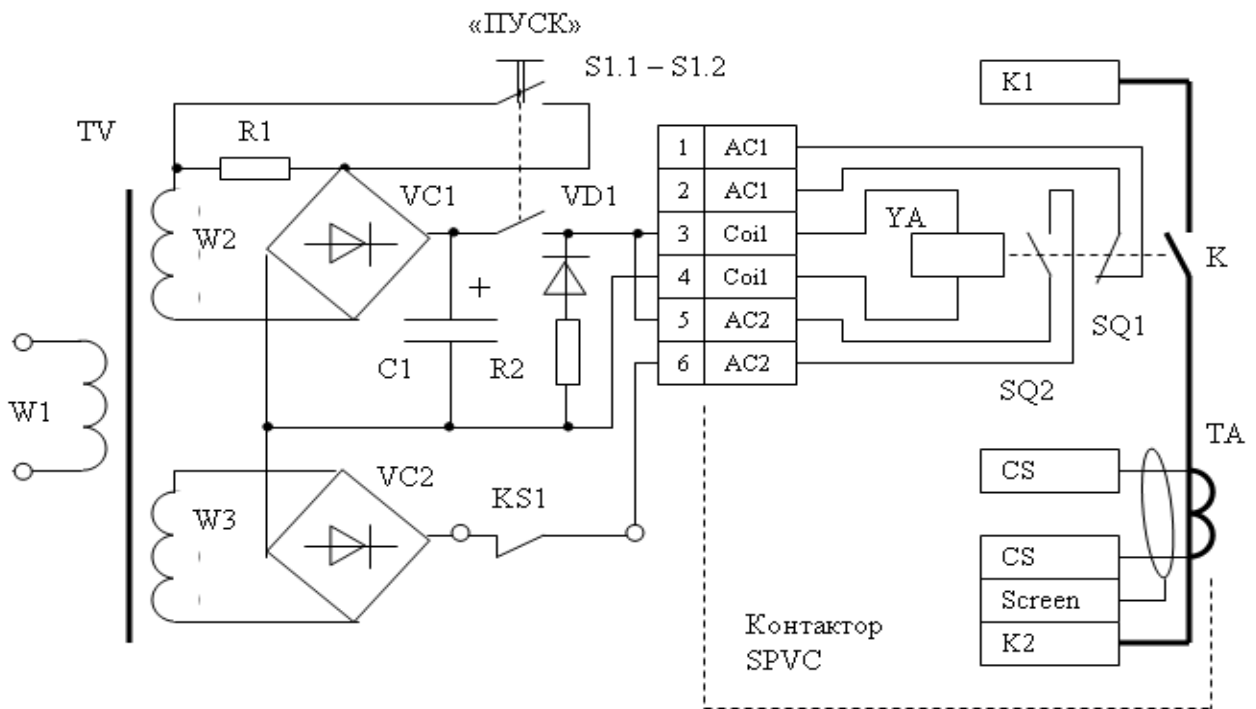


Рисунок 2.21 – Схема узла управления вакуумным контактором коммутации нейтрали вторичных фазных обмоток трансформатора подстанции участка шахты

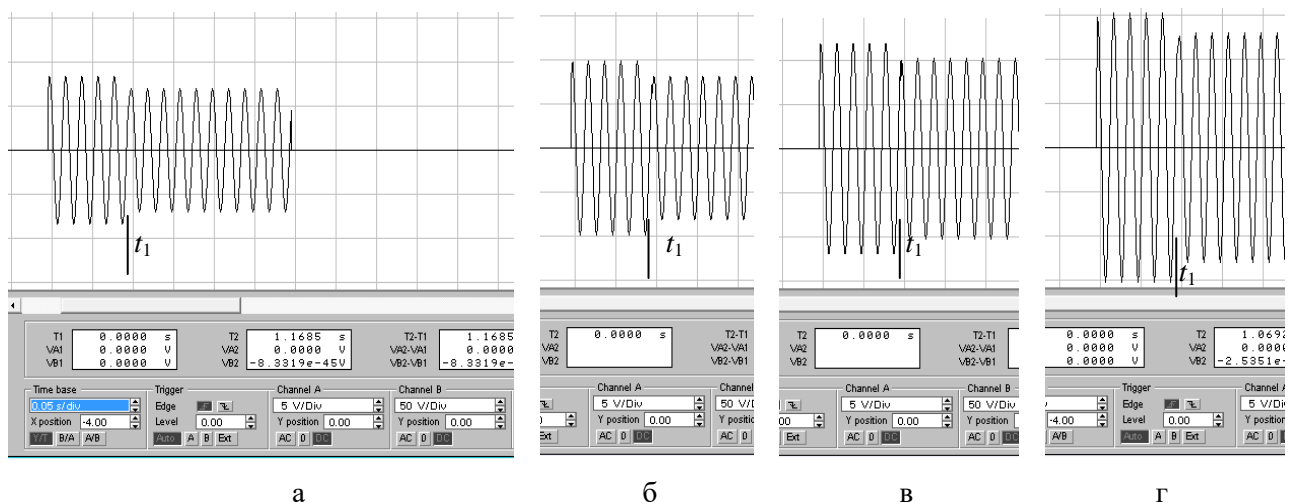


Рисунок 2.22 – Осциллограммы моделирования напряжения на сопротивлении утечки ($R_{ут} = 1$ кОм) с фазы на ЦП кабеля (длиной 200 м) при отключении в момент времени t_1 контакторов КМ1 и КМ2 (по рисунку 2.20) при активном сопротивлении изоляции кабеля 60 кОм: а – кабель КГЭШ 3x25мм², ёмкость изоляции 0,0848 мкФ/фазу; б – кабель КГЭШ 3x35 мм², ёмкость изоляции 0,104 мкФ/фазу; в – кабель КГЭШ 3x50 мм², ёмкость изоляции 0,134 мкФ/фазу; г – кабель КГЭШ 3x70 мм², ёмкость изоляции 0,174 мкФ/фазу, линейное напряжение сети – 1140 В; $R_1 = R_2 = R_3 = 3$ кОм (по рисунку 2.20); параметры времени и напряжения – на шкале настройки виртуального осциллографа

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о влиянии ёмкости изоляции кабеля на величину тока в цепи утечки, что косвенно иллюстрируется увеличением падения напряжения на R_1 в вариантах моделирования с повышением сечения рабочих жил кабеля, а также о свойстве ограничения тока в цепи утечки вследствие управляемой коммутации нейтрали трансформатора подстанции (в момент времени t_1), что также иллюстрируется параметром напряжения на R_1 и свидетельствует о возможности сохранения электропоражающего параметра (количества электричества через человека) на безопасном уровне $q \leq 50$ мА·с при комбинировании защитного отключения КТП с ускоренной коммутацией нейтрали её трансформатора даже в условиях относительно низких активных и ёмкостных сопротивлений между фазами сети и землёй (центральный провод кабеля заземлён). В случае изменения назначения ЦП и изоляции его от земли параметр q будет ожидаемо снижаться в связи с увеличением сопротивлений между фазами сети и землёй.

2.5 Выводы по разделу 2

1) Применяемые в конструкции рудничных асинхронных двигателей электроизоляционные материалы и компоновочные решения, а также применяемые средства защиты изоляции от перегрева обуславливают крайне низкую вероятность контакта фазного проводника с металлическими корпусами этих электрических машин, что подтверждается практикой их промышленной эксплуатации и снижает степень актуальности заземления их металлических корпусов. В то же время, заземление металлических корпусов рудничных асинхронных двигателей с использованием центральных проводов кабелей электропитания в качестве элементов заземления, преследуя цель защиты человека от маловероятного события – электропоражения при прикосновении к корпусу электрической машины, находящемуся под напряжением сети, сопровождается формированием в системе электроснабжения участка шахты постоянно действующего электропоражающего фактора - высоких величин ёмкостной проводимости изоляции между фазами сети и землёй. Несмотря на режим изолированной нейтрали трансформатора, это делает шахтную участковую электрическую сеть постоянно опасной в контексте поражения человека электрическим током.

2) В контексте повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети, в целях снижения ёмкостной проводимости изоляции, обоснована целесообразность принципиального изменения концепции построения системы электроснабжения участка шахты в части назначения и коммутации центральных проводов силовых кабелей электропитания асинхронных двигателей. Не будучи подключенными к заземлениям, эти центральные провода могут быть использованы в качестве информационных каналов локализованных в структуре асинхронных двигателей средств выявления контакта фазы с их металлическими корпусами и представляющих собой структурные компоненты системы автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети.

3) Не присоединение к заземлению центрального провода, гальванически связанного с экранами изоляции фазных проводов силового кабеля, позволяет адаптировать петлевой метод для решения задачи выявления места повреждения кабеля, что подтверждается разработанным алгоритмом и схемой технического решения.

4) Решение задачи выявления контакта фазы с металлическим корпусом асинхронного двигателя с последующим его защитным отключением может быть осуществлено двухкомпонентным средством, функциональные элементы которого локализованы в структурах данного асинхронного двигателя и коммутирующего его магнитного пускателя. Основу средства выявления контакта фазы с корпусом асинхронного двигателя (в общем случае – с изолированным от электрической сети объектом) составляет R-C-VD-цепь, присоединяемая между точкой соединения в «звезду» фазных обмоток двигателя и его металлическим корпусом (в общем случае – между соединёнными в «звезду» функциональными элементами присоединения к фазам электрической сети и изолированным от неё объектом). Совместно с действующими средствами защиты электрооборудования от аварийных и опасных состояний разработанные технические решения позволяют осуществить полный комплекс защитных функций и представляют собой систему автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети.

5) Установлена чувствительность средства выявления контакта фазы с изолированным от электрической сети объектом в случае формирования цепей утечки двух и трёх фаз с одинаковыми ($R_{\text{ут}} = 1 \text{ кОм}$) и разными величинами активных сопротивлений:

- одновременное формирование цепей утечки с двух фаз на объект;
- одновременное формирование цепей утечки с двух фаз и спустя интервал времени $\Delta t \geq 0,001 \text{ с}$ на объект.

Это примерно соответствует эффекту выявления одновременного формирования цепей утечки с трёх фаз на изолированный от электрической сети объект.

6) С целью адаптации применительно к рудничному асинхронному двигателю, обмотки статора которого соединены по схеме «треугольник», вывод локализуемого в структуре двигателя устройства выявления контакта с его корпусом фазы сети, изначально предназначенный для подключения к точке соединения обмоток статора в «звезду», должен быть подключен к точке нулевого потенциала (соединения в «звезду») диодной группы подключения к фазам трёхфазной электрической сети.

7) С целью повышения эффективности защитного отключения электрической сети участка шахты при повреждении изоляции кабеля, отходящего от трансформаторной подстанции обоснован способ, состоящий в коммутации цепи нейтрали её вторичных фазных обмоток, сопровождаемый присоединением (в процессе защитного отключения) токоограничивающих резисторов в последовательные цепи с фазными вторичными обмотками трансформатора подстанции. Управление процессом автоматического защитного отключения подстанции может быть осуществлено схемой локализуемого в электротехническом объекте устройства контакта с его корпусом фазы сети, что свидетельствует об универсальности его применения.

РАЗДЕЛ 3

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ КОНТАКТА ФАЗЫ С ОБЪЕКТОМ КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАЩИТНЫМ ОТКЛЮЧЕНИЕМ СИЛОВЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ

3.1 Обоснование структуры и исследование функциональных возможностей датчика контакта «фаза - корпус» электроустановки

Схема устройства выявления цепи: «фаза - корпус АД» представлена на рисунке 3.1 [9, с. 110-118]. Размыкающий контакт К1.1 реле К1 предусмотрен для управления отключением контактора МП. Переходное сопротивление R_{π} между корпусом АД и землёй может быть не регламентировано (так как предусмотрено выявление электрического контакта между фазой сети и корпусом АД). Отсутствие такого контакта является нормальным режимом эксплуатации электрооборудования, не сопровождается формированием электропоражающего фактора и не требует выполнения функций, сопоставимых с заземлением корпусов АД (в условиях шахты – через ЦП кабелей).

Результаты моделирования напряжений на резисторе $R1 = 1$ кОм (ёмкость конденсатора $C1 = 500$ мкФ) представлены на рисунке 3.2, где позициями «а», «б», «в», «г», «д» обозначены: а, в – линейное напряжение сети 660 В; б, г, д – линейное напряжение сети 1140 В; а, б, в – импедансы изоляции кабеля между 1-й, 2-й, 3-й фазами и землёй одинаковы; а, б, г – непосредственное соединение фазы с корпусом двигателя; в, д – соединение «фаза – земля – корпус двигателя» через активное сопротивление $R_{yf}=1$ кОм; г, д – импедансы изоляции цепей «фаза – корпус двигателя»: 1-я фаза: $R_{\phi-3} = 100$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,2$ мкФ; 2-я фаза: $R_{\phi-3} = 120$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,5$ мкФ; 3-я фаза: $R_{\phi-3} = 60$ кОм; $C_{\phi-3} = 0,3$ мкФ; масштаб напряжения 500 В/деление [82].

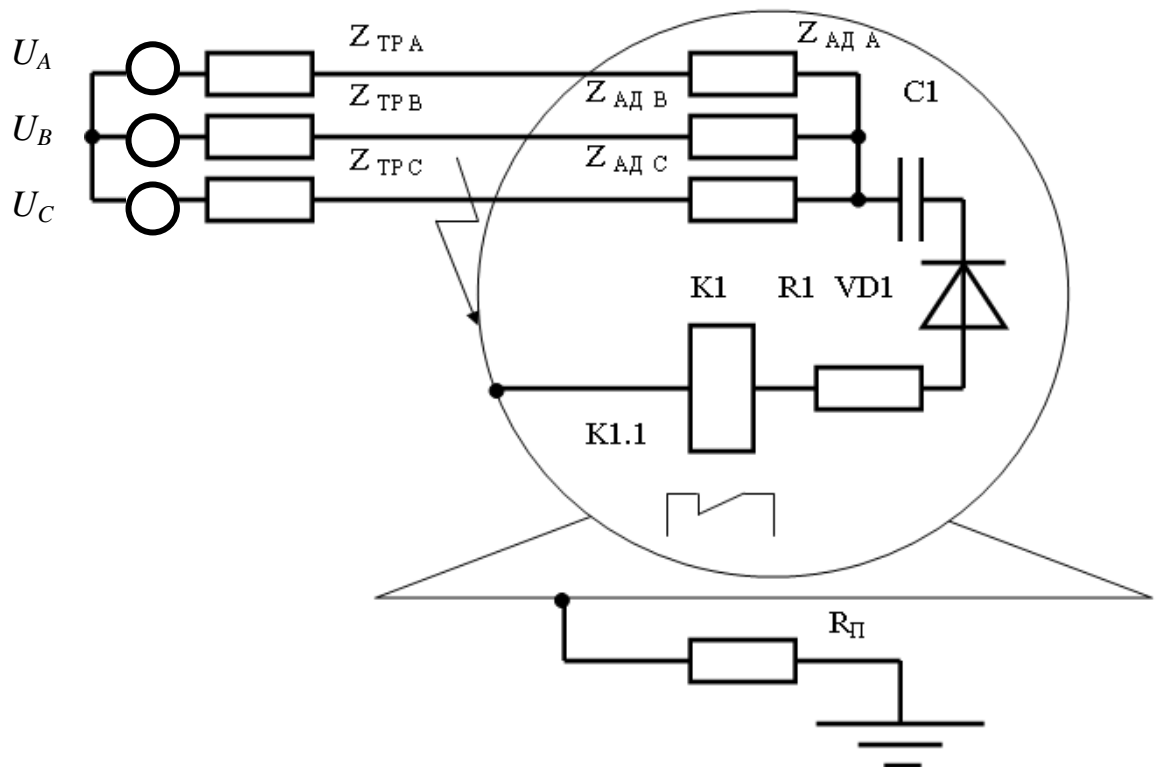


Рисунок 3.1 – Схема устройства выявления контакта фазы сети с корпусом асинхронного двигателя (электротехнической установки)

Результаты исследования позволяют утверждать, что амплитуда информационного сигнала на резисторе $R1$ (Рисунок 3.1), начиная с момента времени $t1$ (Рисунок 3.2) появления высокой проводимости с фазы на корпус АД, достаточна для формирования команды на отключение контактора магнитного пускателя (срабатывание реле $K1$):

- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и корпусом АД;
- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и землёй, в том числе, между фазой и землёй через сопротивление человека ($R_{yt}=1$ кОм), прикоснувшегося к фазе (при малом переходном сопротивлении R_n почвы);
- при появлении контакта ($R \approx 0$ Ом) между фазой и землёй (в предположении, что $R_n > 1$ кОм) в момент $t1$ (Рисунок 3.2в, Рисунок 3.2д) касания человеком ($R_{yt}=1$ кОм), находящимся в контакте с землёй, корпуса АД.

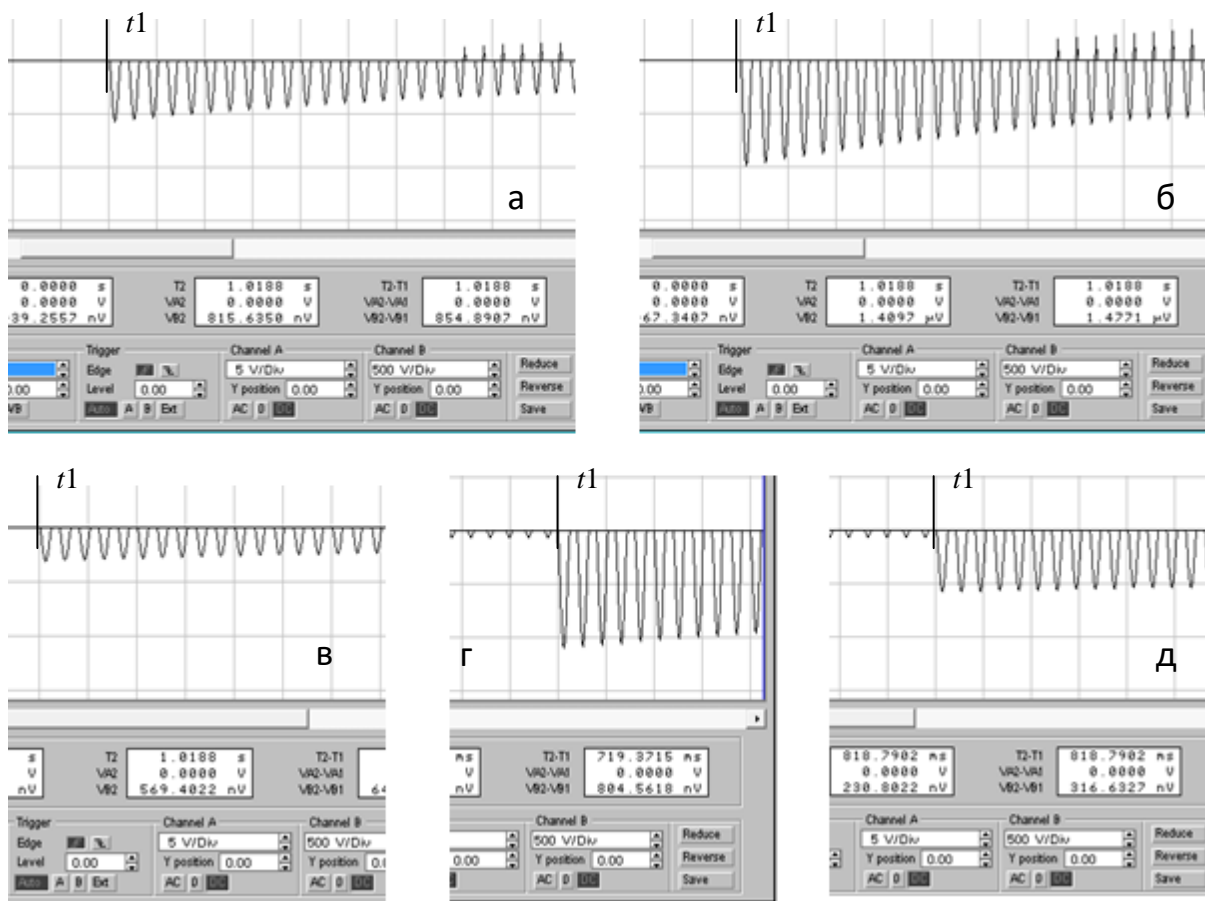


Рисунок 3.2 – Осциллограммы напряжений на резисторе R1 устройства (Рисунок 3.1) в момент времени t_1 появления высокой проводимости с фазы на корпус электродвигателя

В частности, амплитуды импульсов напряжения на резисторе R1 на начальном этапе процесса возникновения контакта фазы с корпусом АД:

- превышают 500 В (Рисунок 3.2а, Рисунок 3.2 д);
- превышают 1000 В (Рисунок 3.2б, Рисунок 3.2 г);
- составляют около 260 В (Рисунок 3.2в).

До момента времени t_1 появления высокой проводимости с фазы на корпус АД величина информационного сигнала на резисторе R1 устройства существенно ниже величины, соответствующей команде на защитное отключение магнитного пускателя, в том числе, и при существенной разности импедансов изоляции между фазами сети и землёй (Рисунок 3.2г, Рисунок 3.2д), что позволяет устройству надёжно реагировать на аварийное (опасное) состояние.

Если $R_{\pi} \gg 0$, эффект прикосновения человека одновременно к фазе сети и к земле не будет сопровождаться электропоражающим фактором ввиду протекания безопасной величины тока через тело человека, отсутствия активных и ёмкостных проводимостей между фазами сети и землёй.

Данное техническое решение позволяет отказаться от использования ЦП шахтных кабелей в качестве заземляющих проводников и использовать их в качестве обособленных проводников, в частности, в процессе выявления повышенной проводимости изоляции фазного провода кабеля.

Эта схема может быть применена и для выявления повреждения изоляции фазных проводников кабеля, если устройство по рисунку 3.1 присоединить не к корпусу электроустановки, а к ЦП кабеля, при том, что катод диода VD1 будет присоединён на общую точку трёхфазной цепи присоединения к фазам сети. Техническая реализация в этом случае возможна при размещении устройства в структуре магнитного пускателя.

3.2 Адаптация схемы магнитного пускателя к выполнению защитной функции при возникновении контакта фазы сети с объектом контроля

К функциям шахтных магнитных пускателей (МП) относятся отключения силовых присоединений по факту появления в них аварийных (опасных) состояний [83]. Принцип управления защитным отключением МП при появлении повышенной проводимости изоляции между фазными проводами отходящего кабеля и его ЦП обоснован в исследовании [8, с. 34-47]. Практическую актуальность представляет решение задачи надёжного формирования команды на защитное отключение МП при появлении повышенной проводимости в цепи «фаза сети – корпус присоединённого АД». В этом случае, с учётом других защитных функций, в схеме МП будет сосредоточен полный комплекс средств автоматического защитного отключения отходящего присоединения, а в СЭС

участка шахты – возможна реализация способа селективного выявления силового присоединения с повышенной проводимостью изоляции [84].

В контексте адаптации схемы МП к реализации комплексной защиты силового присоединения [85] выделим следующие аспекты, относящиеся к его схемным решениям и особенностям функционирования. Коммутационная способность контактора МП согласуется с параметрами коммутируемых токов нагрузки, в том числе, пусковых токов АД и токов короткого замыкания, а быстродействие отключения находится в интервале времени отключения автоматических выключателей, что позволяет осуществлять защитное отключение силового присоединения.

Вывод о быстродействии коммутационной функции МП основан на анализе параметров применяемых контакторов, где преобладают вакуумные силовые коммутационные аппараты. Так, согласно [86], время отключения вакуумного однофазного контактора типа SPVC-630 составляет $0,007 \pm 0,002$ с, а собственное время отключения трёхфазного контактора типа КВТ-1,14 составляет не более 0,14 с. При этом, время дребезга главных контактов каждого полюса контактора КВТ-1,14 при включении составляет не более 0,005 с, а разновременность замыкания главных контактов трёх полюсов при включении и размыкания главных контактов трёх полюсов при отключении не превышает 0,003 с. Для сравнения, согласно [6, с. 459-467, 79], собственное время отключения автоматического выключателя серии А37ХХ в зависимости от типоразмера составляет $0,08 \div 0,1$ с. Следует отметить, что контакторы серии КВТ-1,14 являются одними из наиболее распространённых в структуре шахтных МП отечественного производства, что позволяет принять этот тип контактора в качестве базового для дальнейшего рассмотрения.

Предназначенные для эксплуатации в потенциально опасных условиях угольной шахты МП выполняют ряд защитных функций, обусловленных спецификой их функционирования:

– автоматическое отключение отходящего присоединения при возникновении в нём междуфазного короткого замыкания;

- температурная защита присоединённого АД, работающего с перегрузкой, в том числе, защитное отключение АД в случае его несостоявшегося пуска;

- контроль сопротивления изоляции отключенного силового присоединения и блокировка включения контактора МП при недопустимо низком сопротивлении изоляции кабеля.

Кроме этого, схема дистанционного управления контактором также позволяет осуществить ряд защитных функций:

- нулевая защита - отключение контактора при исчезновении напряжения в сети и невозможность его последующего самопроизвольного включения;

- защита от потери управляемости при повреждении цепи подключения кнопочного поста.

Следствием развития схмотехники рудничной силовой коммутационной аппаратуры стало дополнение защитных функций МП:

- предварительным контролем состояния изоляции, защитой от утечек тока на землю и от токов короткого замыкания в отходящих присоединениях сигнальных проводников – цепей напряжением 36 В и 42 В;

- контролем цепей заземления передвижных машин при питании их линейным напряжением 1140 В.

Это свидетельствует о тенденции реализации на базе МП полного комплекса защитных функций. В то же время, схмотехника контроля цепей заземления передвижных машин, реализованная блоком БКЗ [87]:

- существенно усложняет схему МП, снижая её надёжность (применение мостовой схемы контроля сопротивления изоляции, параметры которой существенно зависят от величин сопротивлений плеч измерительного моста и характеристик полупроводникового усилителя);

- предполагает заземление корпусов АД (подключение к элементам заземления ЦП кабелей увеличивает ёмкостную проводимость кабельной сети);

- полностью теряет свою актуальность при условии применения

альтернативного подхода к формированию структуры СЭС участка шахты, где вследствие применения локализованных в структуре АД средств контроля проводимости цепей: «фаза электрической сети – корпус электроустановки» не предусматривается заземление металлических корпусов электрических машин.

В то же время, реализация выявления цепи электрической проводимости: «фаза – корпус АД» техническими средствами, локализуемыми в структуре АД и воздействующими на МП представляет собой завершающее звено в структуре комплекса автоматических защит от аварийных и опасных состояний отходящего от МП силового присоединения.

Техническая реализация способа передачи на схему МП информационного сигнала от локального средства выявления опасного состояния силового присоединения АД иллюстрируется рисунком 3.3. Измерительная R-C-VD – цепь представлена блоком контроля параметров проводимости (БКПП), в котором исполнительное реле в случае выявления повышенной проводимости между фазами сети и корпусом АД своим контактом К искусственно создаёт повышенную проводимость через сопротивление резистора R с фазы сети на обособленный ЦП кабеля. При наличии в структуре МП аналогичной R-C-VD – измерительной цепи (блок БКПП, присоединённый к сети на выходе магнитного пускателя через узел УП) это приведёт к непосредственному отключающему воздействию на его контактор.

Сопутствующими функциями в этом случае должны выступать:

- фиксация команды на защитное отключение контактора МП (отрабатывается триггерным узлом);
- блокирование отключенного состояния контактора МП;
- возможность деблокирования отключенного состояния контактора МП.

Принципиальная схема устройства, реализующего данный способ, представлена на рисунке 3.4, где элементами триггера на элементах ИЛИ-НЕ (D1-D2) реализуется функция запоминания импульсной команды (в случае формирования сигнала ограниченной продолжительности) на отключение контактора KM1, формируемой замыканием контакта K1.1 реле K1. Элементы И-

HE (D3 - D4) служат для деблокирования (кнопка «Деблок.») команды на удержание контактора КМ1 пускателя в отключенном состоянии.

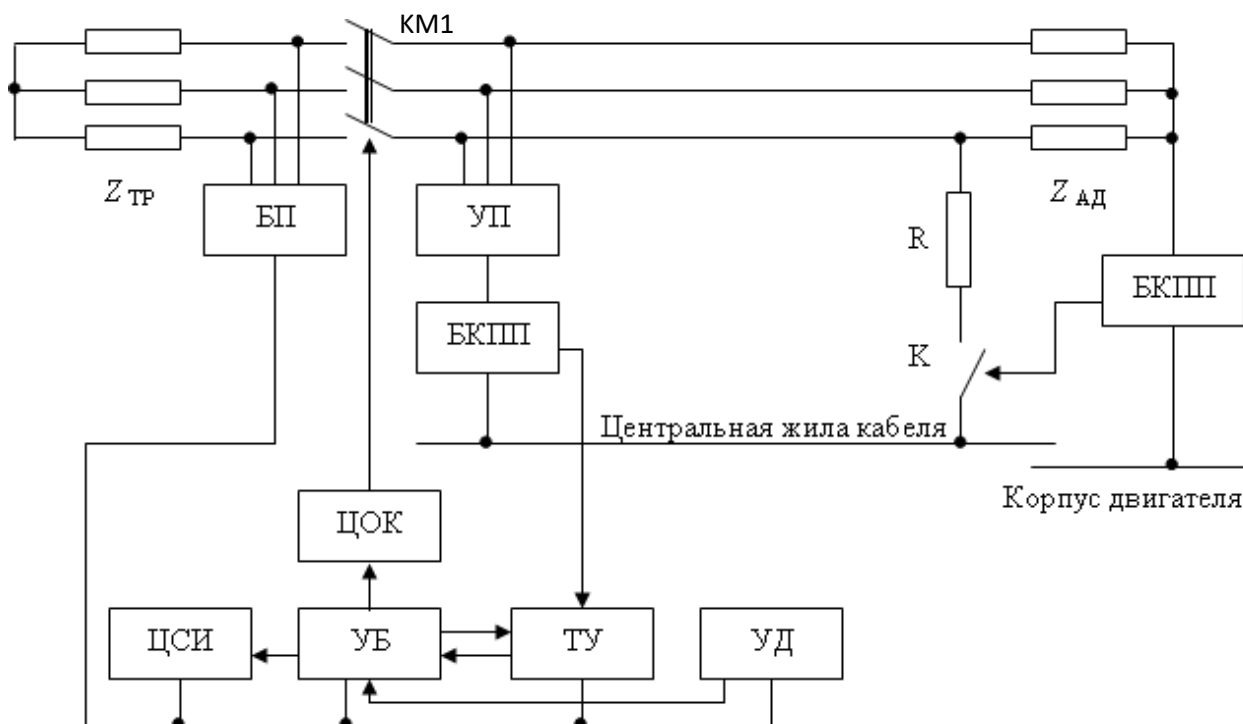


Рисунок 3.3 – Блок-схема устройства защитного отключения магнитного пускателя при возникновении повышенной проводимости изоляции отходящего кабеля, включая проводимость цепи «фаза – корпус двигателя» силового присоединения: БКПП – блок контроля параметров проводимости; БП – блок питания магнитного пускателя; УП – узел присоединения к фазам сети на выходе магнитного пускателя; ЦОК – цепь отключения контактора магнитного пускателя; КМ1 – силовые контакты магнитного пускателя; УБ – узел блокировки; ТУ – триггерный узел; УД – узел деблокировки; ЦСИ – цепь световой индикации; $Z_{ТР}$; $Z_{АД}$ - импедансы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции и статора асинхронного двигателя силового присоединения, соответственно.

Исполнительным элементом защиты выступает реле К3. Его нормально включенное состояние позволяет осуществлять самоконтроль исправности функциональных узлов защиты, а отключение – контактом К3.1 в точках «А1», «А2» разъединяет цепь дистанционного управления контактором МП.

Как следует из схем (Рисунок 3.3, Рисунок 3.4), дооснащение структуры МП R-C-VD – измерительной цепью, подключенной между фазами сети (узел УП) и обособленным ЦП отходящего кабеля, позволяет, помимо отработки защитной

функции при появлении контакта фазы сети с корпусом электродвигателя, выявлять состояние повышенной проводимости изоляции этого кабеля (проводимость между фазами кабеля и его обособленным ЦП). В этом случае также будет иметь место реакция блока БКПП в структуре МП.

Развитием данного подхода может быть реализация функции выявления контакта фазы сети с металлическим корпусом МП. Это поясняется схемой (Рисунок 3.5), где предусмотрен дополнительный блок БКПП между фазами сети (присоединён через узел УП) и металлическим корпусом МП. Совместно с цепью R1-K1 он выполняет ту же функцию, что и блок БКПП с цепью R2-K2 в структуре АД электропотребителя. В этом случае защитное отключение МП не приведёт к устранению опасного состояния объекта, если контакт фазы сети с его металлическим корпусом имел место со стороны ввода к контактору. Но в полном объёме защитная функция будет реализована в случае контакта фазы сети с корпусом МП в цепи, отходящей от его контактора, что повышает уровень электробезопасности эксплуатации СЭС участка шахты.

При условии применения в качестве магистральных – кабелей с обособленным ЦП появляется возможность применения структуры R-C-VD – измерительной цепи (включающей исполнительное реле, в соответствии с рисунком 3.2) в качестве устройства контроля состояния изоляции присоединений магистрального кабеля. В этом случае воздействие исполнительного реле R-C-VD – измерительной цепи будет распространяться на автоматический выключатель участковой КТП, а контрольная функция будет возможна и в отношении возникновения контакта фазы с корпусом МП (на его вилловом вводе), станции управления и т.п.

Показателем надёжности защитной функции является уровень отличия информационного сигнала (U_1) в измерительной цепи при наличии контакта фазы с корпусом АД от величины электрического параметра в этой же цепи (U_2) при отсутствии такого контакта ($U_1/U_2 \geq 1,5$). Параметр U_1 должен быть достаточным для приведения в действие исполнительного устройства защиты, либо промежуточного коммутационного элемента на входе этого устройства.

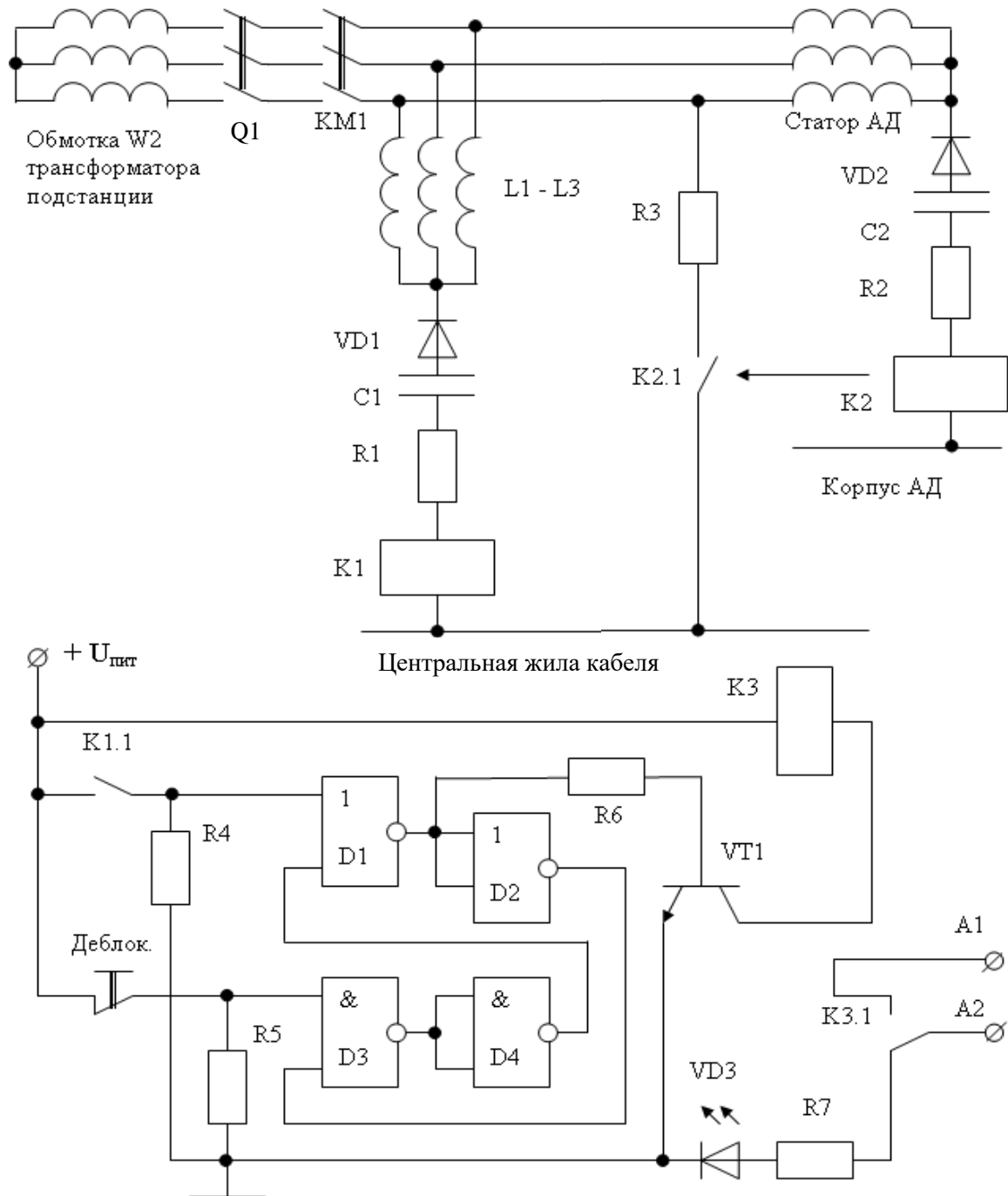


Рисунок 3.4 – Схема устройства защитного отключения магнитного пускателя при появлении повышенной проводимости изоляции в кабеле силового присоединения, а также в цепи: «фаза – корпус присоединённого электродвигателя» (Q1 – обобщённая структура силовых коммутационных устройств в последовательной трёхфазной цепи перед контактором KM1)

корпусу электрооборудования) $R_{\text{чел}} = R_{\text{yt}} = 1$ кОм; активное сопротивление и индуктивность фазы статора рудничного АД высокой мощности (200 кВт и выше) имеют порядок, соответственно, $R_s \approx 0,07 \div 0,1$ Ом; $L_s \approx 0,0003 \div 0,0005$ Гн, что несущественно в отношении ограничения тока в цепи «фаза сети – тело человека – корпус АД – измерительная цепь БКПП – «звезда» обмоток статора АД». Принимаем: $R_s = 0,090811$ Ом и $L_s = 0,00032833$ Гн, что соответствует параметрам двигателя типа 2ЭКВ4УС2 мощностью 220 кВт [88].

В качестве электроэнергетического источника принимаем участковые КТП типа КТПВ-1250/6/0,69 и КТПВ-1250/6/1,2 с активными сопротивлениями и индуктивностями вторичных обмоток $R_{\text{тр}} = 0,0025$ Ом; $L_{\text{тр}} = 0,0000665$ Гн и $R_{\text{тр}} = 0,0076$ Ом; $L_{\text{тр}} = 0,000219$ Гн, соответственно.

Как следует из результатов моделирования, на интервале времени Δt амплитуды импульсов тока i_{YT} снижаются (в сети напряжения 660 В – от 139 мА до 124 мА; в сети напряжения 1140 В – от 225 мА до 214 мА), что определяется процессом заряда конденсатора C в блоке БКПП. Учитывая синусоидальность импульсов тока i_{YT} и величины расчётных значений его амплитуд, могут быть вычислены действующие значения этого тока для каждого интервала импульса (от t_{H} до t_{K}), где ΔT - интервал времени, включающий продолжительность импульса тока и продолжительность последующей бестоковой паузы:

$$I_{\text{YT}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_{\text{H}}}^{t_{\text{K}}} i_{\text{YT}}^2 dt} \quad , \quad (3.1)$$

Результатом вычислений является определение количества электричества через тело человека на интервале времени осуществления защитного отключения электрической сети контактором магнитного пускателя:

$$q = \sum_{t=0}^{t=0,14c} I_{\text{YT}i} \Delta T i \quad , \quad (3.2)$$

где ΔT_i – продолжительность импульса тока i_{VT} и следующей за ним паузы на i -м интервале измерения.

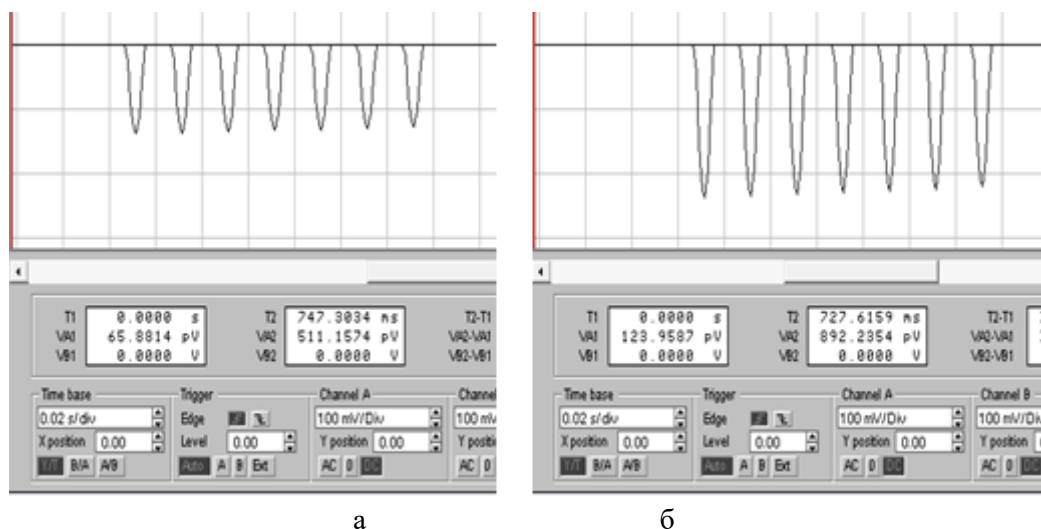


Рисунок 3.6 – Осциллограммы импульсов тока (мА) в цепи «фаза сети – тело человека – корпус электродвигателя – «звезда» обмоток статора электродвигателя при линейном напряжении сети 660 В (а) и 1140 В (б) на временном интервале защитного отключения контактора магнитного пускателя - представлены в результате моделирования как напряжения, снятые на резисторе сопротивлением 1 Ом. Цена деления шкалы осциллографа – 100 мВ/деление

В данном случае, в течение $\Delta t = 0,14$ с параметры количества электричества (q) через тело человека составляют для сети линейных напряжений 660 В и 1140 В: $q = 12,55$ мА·с; и $q = 21,72$ мА·с, соответственно, что существенно меньше в сопоставлении с предельно допустимыми параметрами ($q_{\text{доп.}} = 50$ мА·с).

Величина тока i_{VT} соответствует (по критерию достаточности) параметрам срабатывания значительной номенклатуры исполнительных электромагнитных реле (как исполнительных элементов блока БКПП). Этот ток может быть ещё более понижен увеличением сопротивления резистора R данного блока. Однако и при $R = 1$ кОм работоспособность средства защиты при $q < q_{\text{доп.}}$ поддерживается.

При условии применения данных схемных решений, обязательного изолирования от заземления ЦП шахтных кабелей, использующихся в структуре СЭС участка шахты, дополнительным средством в области повышения электробезопасности эксплуатации силового рудничного электрооборудования следует считать наложение изоляционных покрытий на внутренние поверхности

отсеков кабельных вводов силовых коммутационных аппаратов и АД.

Таким образом, доказана возможность расширения комплекса защитных функций шахтного МП вследствие адаптации его схемы к процессу выявления (с последующим защитным отключением) электрического контакта фазы сети с незаземлённым металлическим корпусом присоединённого АД техническими средствами, локализованными в структуре АД и представленными схемой (Рисунок 3.4).

3.3 Техническая реализация процесса формирования защитной функции в структуре «пускатель - двигатель» при неприсоединении к заземлению центрального провода кабеля

Принципиальным отличием альтернативной концепции построения СЭС участка шахты является обособление (изоляция) ЦП кабелей электропитания АД от элементов заземления при обязательном применении локализованных в структурах этих двигателей средств выявления контакта фаз с их металлическими корпусами и защитного отключения последних. Условием достижения высоких показателей надёжности при реализации в промышленности этой концепции является минимизация схемных изменений в структуре силового электрооборудования участка шахты. Этой цели соответствует схема устройства защиты от повреждения в кабельном присоединении рудничного АД (Рисунок 3.7) [89, 90].

В соответствии с этой схемой, в отсеке кабельных вводов каждого рудничного АД должна быть предусмотрена цепь из соединённых последовательно резистора R1, конденсатора C1, обмотки K1 электромагнитного реле с замыкающим контактом K1.1 и диода VD1, подключенная между металлическим корпусом АД и контактом (X1) соединения между собой фазных обмоток статора двигателя. ЦП кабеля электропитания двигателя при этом не присоединён ни к металлическим корпусам пускателя, ни к металлическому

корпусу АД и не имеет контакта с сетью заземления. В отсеках кабельных вводов двигателя и пускателя этот центральный провод присоединён к изолированным от металлических корпусов клеммам X2 и X3, соответственно.

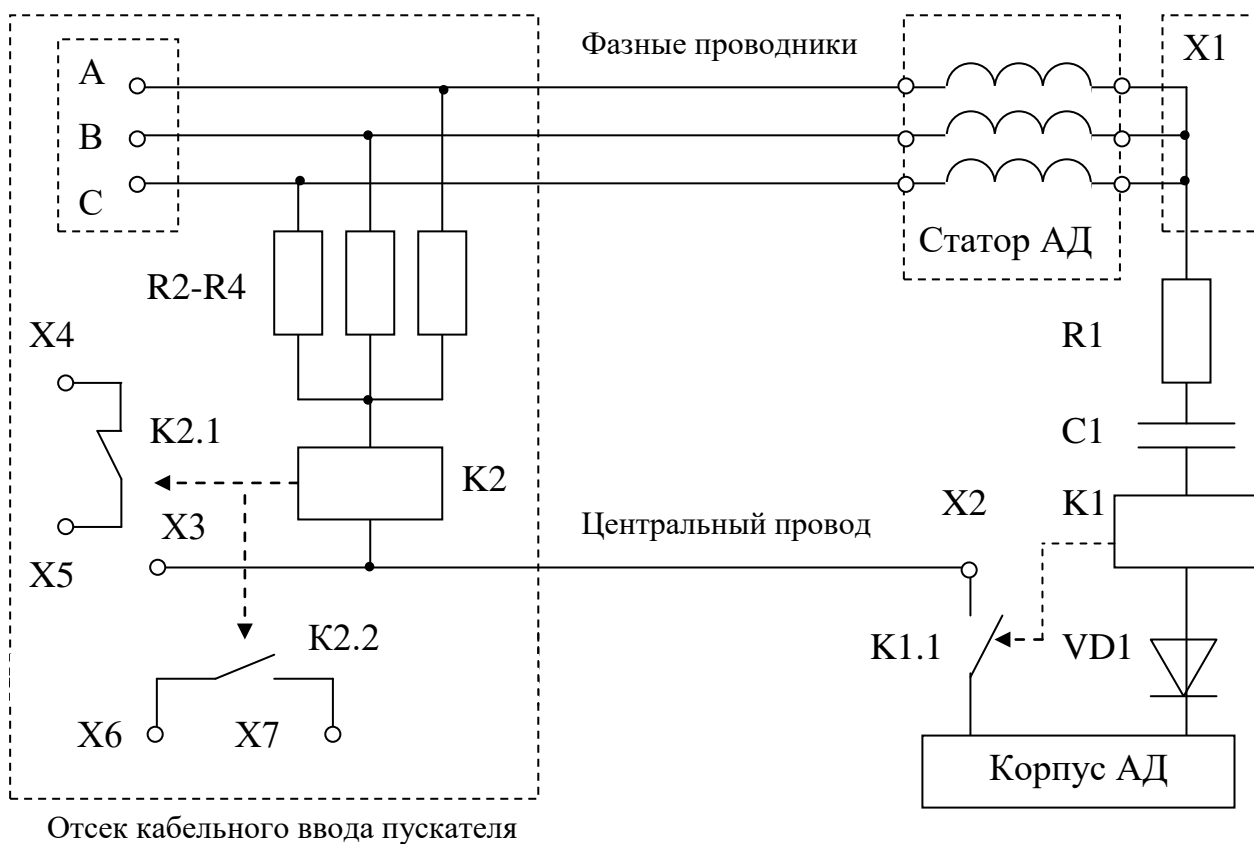


Рисунок 3.7 – Устройство защиты от повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя

В этих же отсеках кабельных вводов пускателей (моторные камеры) в этом случае должны быть предусмотрены три резистора R2, R3, R4, а также электромагнитное реле K2, с размыкающим контактом K2.1. Резисторы R2, R3, R4 своими первыми выводами присоединены к силовым выводам (А, В, С) пускателя, а вторыми выводами присоединены к первому выводу обмотки реле K2, второй вывод которой присоединён к клемме X3 подключения центрального провода кабеля электропитания асинхронного двигателя. При этом размыкающий контакт K2.1 реле K2 предназначен для подключения последовательно в цепь дистанционного управления контактором пускателя через клеммы X4 и X5, а замыкающий контакт K1.1 реле K1 (в отсеке кабельного ввода двигателя)

соединён между металлическим корпусом этого двигателя и клеммой X2 присоединения центрального провода кабеля электропитания. Для реализации защитной функции может быть задействован замыкающий контакт K2.2 реле K2.

Действие данного устройства поясняется следующим. В штатном режиме эксплуатации потенциалы точки соединения между собой вторых выводов резисторов R2, R3, R4, а также контакта X1 соединения выводов фазных обмоток статора АД равны нулю, и токи через обмотки электромагнитных реле K2 и K1 не протекают.

В случае повреждения изоляции фазного провода кабеля возникает контакт этого провода в точке повреждения с ЦП кабеля. Этим создаётся путь тока через обмотку реле K2, что приводит к срабатыванию последнего, размыканию контакта K2.1 в цепи дистанционного управления контактором пускателя.

В случае контакта фазного провода кабеля электропитания АД с металлическим корпусом последнего создаётся путь тока через обмотку реле K1, что приводит к срабатыванию последнего и замыканию его контакта K1.1. При этом, через замкнутый контакт K1.1 создаётся путь тока через обмотку реле K2. Данное реле срабатывает, размыкает свой контакт K2.1 в цепи дистанционного управления контактором пускателя, что приводит к его отключению.

Применение конденсатора C1 и диода VD1 в структуре последовательной цепи между корпусом АД и контактом X1 соединения между собой выводов обмоток его статора позволяет отделить силовые цепи электропитания АД в штатном режиме эксплуатации от его корпуса, что соответствует режиму изолированной нейтрали трансформатора, и исключить воздействие на работу защиты от утечек тока на землю в шахтной участковой электрической сети, воспрепятствовать прохождению постоянного оперативного тока этой защиты на металлический корпус двигателя при наличии малого переходного сопротивления между корпусом АД и землёй.

3.4 Обоснование способа блокировки отключенного состояния коммутационного аппарата в процессе реализации защитной функции в структуре многомашинного электротехнического комплекса

В условиях эксплуатации многомашинного электротехнического комплекса следует учитывать вероятность защитного отключения пускателей смежных присоединений при наличии малых переходных сопротивлений между металлическими корпусами их АД и землёй, поскольку вследствие включенного состояния контакторов их пускателей токи с «повреждённой» фазы через измерительную цепь и корпус «аварийного» АД, переходные сопротивления $R_{п}$ почвы (земли) будут также протекать по аналогичным измерительным цепям АД смежных присоединений. Этим обусловлена актуальность обоснования технического решения, обеспечивающего возможность выявления и последующего блокирующего отключения того силового присоединения, в котором возник контакт фазного проводника с незаземлённым металлическим корпусом АД. При разработке этого технического решения за основу принимается концептуальная схема устройства (Рисунок 3.7) и блок-схема алгоритма автоматического защитного блокирующего отключения АД при отсутствии заземления его металлического корпуса (Рисунок 2.10)

Эффект синхронного отключения группы АД при возникновении контакта фазы с металлическим корпусом одного из них исследован на основе компьютерной модели (Рисунок 3.8). В структуре модели активные сопротивления обмоток исполнительных реле объединены с сопротивлениями токоограничивающих резисторов в общее сопротивление (ΣR) измерительной цепи. Принято два АД типа 2ЭДКОФ 250LB4 с параметрами статора: $r_s = 0,057$ Ом; $L_s = 0,00063$ Гн (в модели эти параметры округлены). Линейное напряжение сети: $U = 660$ В, сопротивление переходное: $R_{п} = 0,5$ Ом, сопротивление контакта «фаза – корпус АД»: $R_{к} = 0,005$ Ом. На схеме (Рисунок 3.8) $\Sigma R = 1,0$ кОм.

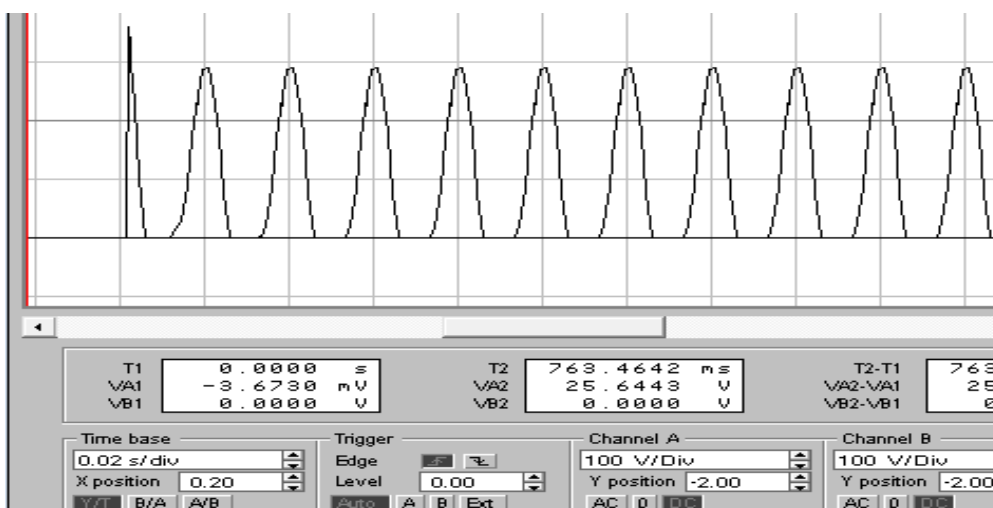
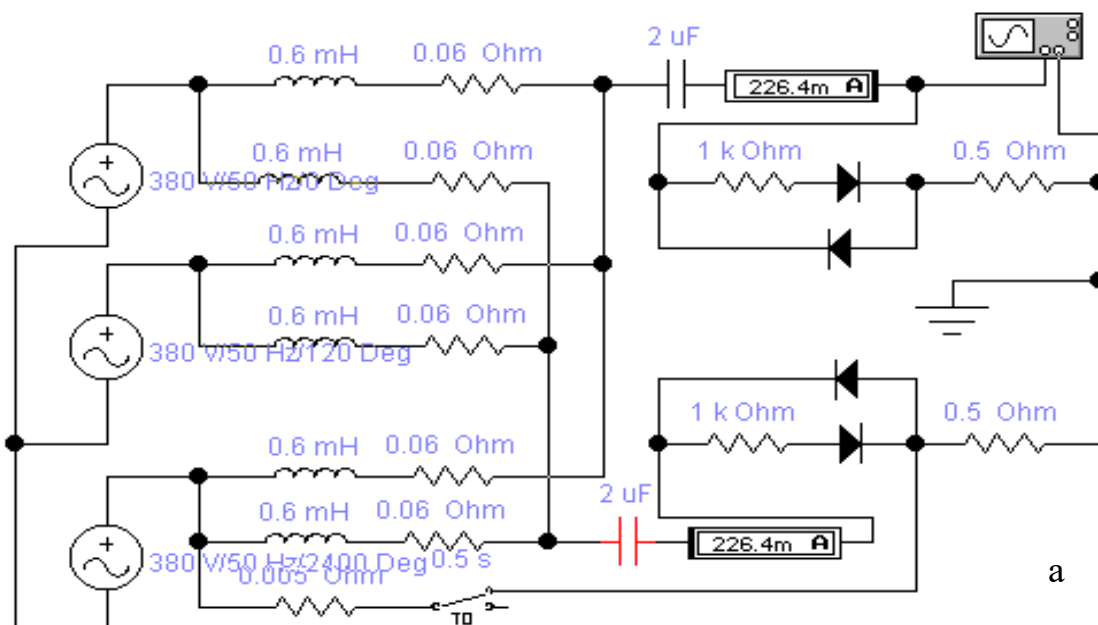


Рисунок 3.8 – Структура модели исследования процессов в многомашинном ЭТК при возникновении проводимости между фазой и незаземлённым корпусом АД (а), осциллограмма напряжения на резисторе измерительной цепи (б)

Структура компьютерной модели позволяет установить закономерности формирования величин амплитуд напряжений на резисторе R-C-VD- цепи в зависимости от величин её ёмкости при $\Sigma R = \text{const}$ и активного сопротивления при $C = \text{const}$,. (соответственно, рисунок 3.9а, б) [91, с. 104-111].

Приняты ёмкости измерительной цепи $1,0 \leq C \leq 10,0$ (мкФ), активное сопротивление $1,0 \leq \Sigma R \leq 30,0$ (кОм), величина линейного напряжения сети

(действующее значение) $U_c = 660$ В. Установлено, что амплитуды импульсов (полуволн) напряжения $U_{m\Sigma R}$, формируемого на резисторе (ΣR) R-C-VD- цепи, находятся в логарифмической зависимости как от ёмкости этой цепи (при $\Sigma R = \text{const}$), так и от её активного сопротивления (при $C = \text{const}$).

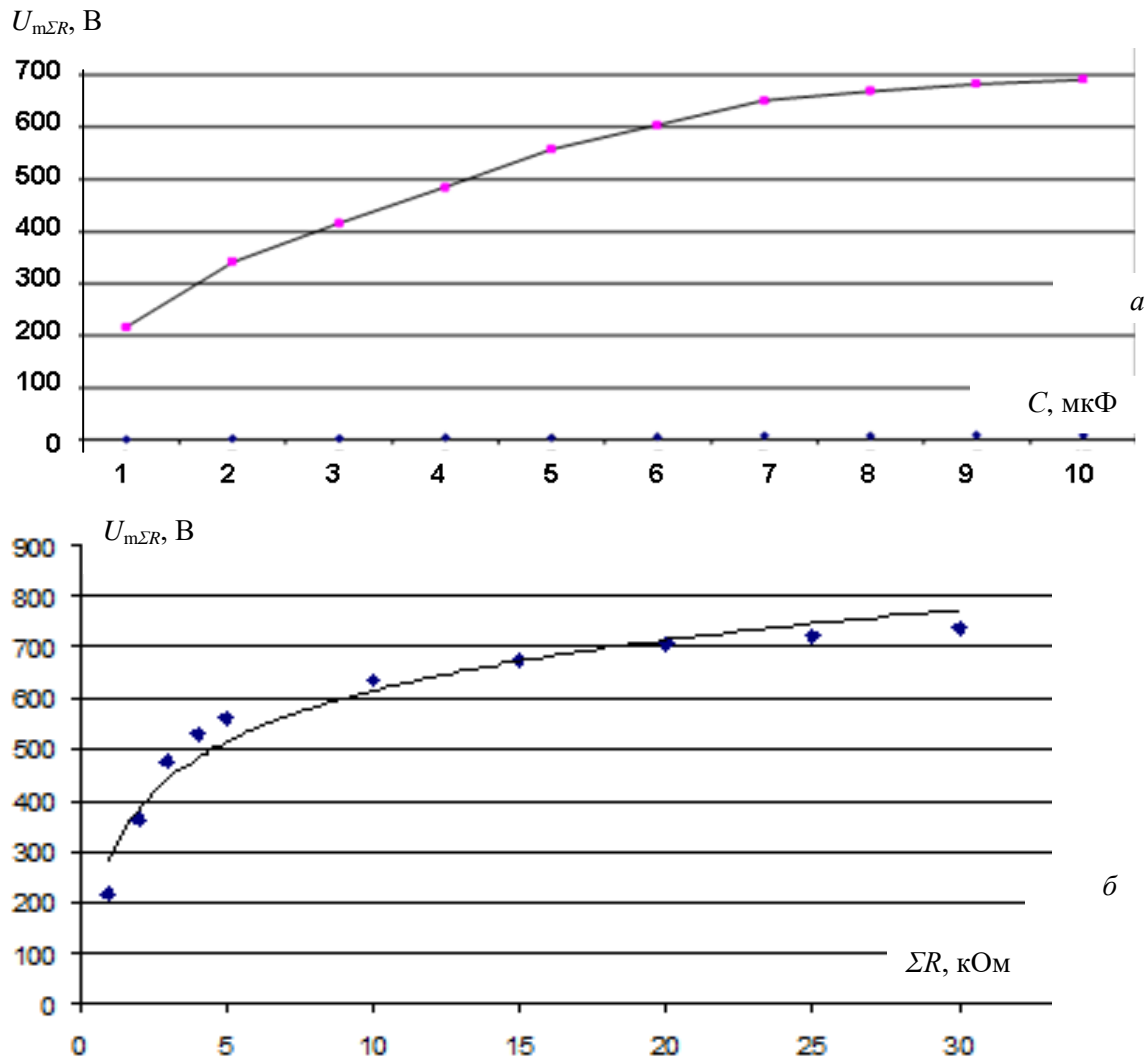


Рисунок 3.9 – Диаграммы напряжений $U_{m\Sigma R}$ на резисторе ΣR измерительной цепи в зависимости от величины её ёмкости C при $\Sigma R = 1$ кОм (а) и величины резистора ΣR при $C = 1$ мкФ (б)

Так, в сети линейного напряжения $U_c = 660$ В:

- при $C = 1,0$ мкФ

$$U_{m\Sigma R} = K_U (144,51 \ln(\Sigma R) + 281,16) \text{ , В} \quad (3.3)$$

- при $\Sigma R = 1,0$ кОм

$$U_{m\Sigma R} = K_U \left(221,17 \ln(C) + 197,34 \right) , \text{ В} \quad (3.4)$$

где размерности ΣR – кОм, C – мкФ, K_U - коэффициент напряжения (позволяет масштабировать результаты моделирования процессов на электрические сети линейного напряжения U_c , отличного от напряжения 660В:

$$K_U = U_{cm} / 660\sqrt{2} , \quad (3.5)$$

где U_{cm} - амплитуда линейного напряжения сети

Аналогичная тенденция наблюдается и при $C > 1,0$ мкФ, $\Sigma R > 1,0$ кОм. Полученные результаты позволяют корректно выбрать исполнительное реле (по номинальному напряжению и току), обмотка которого входит в состав общего сопротивления (ΣR) измерительной цепи.

При условии применения измерительных R-C-VD - цепей в структурах АД при неприсоединении к заземлению их металлических корпусов селективность выявления «аварийного» присоединения может быть достигнута на основе применения средств автоматической блокировки его включения, что иллюстрируется схемой (Рисунок 3.10) [91]. При возникновении электрического контакта между фазой статора АД (точка «А1») и его металлическим корпусом (точка «А2») начнут протекать однополупериодные импульсы тока между точками «А3» («звезда» соединения обмоток статора АД) и «А2» (корпус АД) по цепи: R2 → C1 → K1 → VD4, что вызовет срабатывание реле K1 и подключение ЦП кабеля электропитания АД (замыканием контакта K1.1) к металлическому корпусу этого двигателя, находящемуся в контакте с фазой сети (точки «А1»; «А3»). В этом случае протекает ток в цепи обмотки реле K2 (ЦП кабеля → K2 → R1 → диоды присоединения VD2, VD3 (из группы VD1 – VD3) → фазы сети).

Срабатывание реле К2 обусловит отключение контактора КМ1 пускателя (группы контактов КМ1.1; КМ1.2). При этом, ввиду наличия цепи присоединения реле К2 к фазам сети (через R1 и VD1 – VD3), последнее, а также реле К1, останутся во включенном состоянии после отключения контактора КМ1 пускателя на протяжении существования обратной ЭДС (e_s) АД, переходящего при отключении в режим выбега [92, 93]:

$$e_s = \frac{L_m}{L_p} j(1-S)\omega_0 \psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-S)t}, \quad (3.6)$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и ω_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора. Постоянная времени снижения тока ротора:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_n}{I_0 r_p \omega_0}, \quad (3.7)$$

где r_p – активное сопротивление обмотки ротора АД; U_ϕ – фазное напряжение статора двигателя в режиме холостого хода; $K_n = 1,1$ (для АД с воздушным охлаждением) – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной системы АД; I_0 – ток холостого хода АД.

Наличие переходных сопротивлений (R_n) между металлическими корпусами АД и землёй обуславливает протекание тока (в случае контакта фазы с корпусом одного из АД) по цепям R2 → C1 → K1 → VD4 каждого из двигателей технологических установок участка шахты. При этом существует вероятность отключения их пускателей при малых величинах R_n соответствующих присоединений. Для выявления конкретного силового присоединения с цепью повышенной электрической проводимости между фазой и незаземлённым металлическим корпусом АД может быть задействована схема, аналогичная блокировочному реле утечки (БРУ) [6, с. 371] и адаптированная к эксплуатации в СЭС участка шахты с отделёнными от заземления ЦП силовых кабелей.

В схеме по Рисунку 3.10 выход «-» выпрямителя VC1 подключен к центральному проводу кабеля электропитания АД. Поэтому после отключения контакторов пускателей обеспечивается возможность выявления электрического

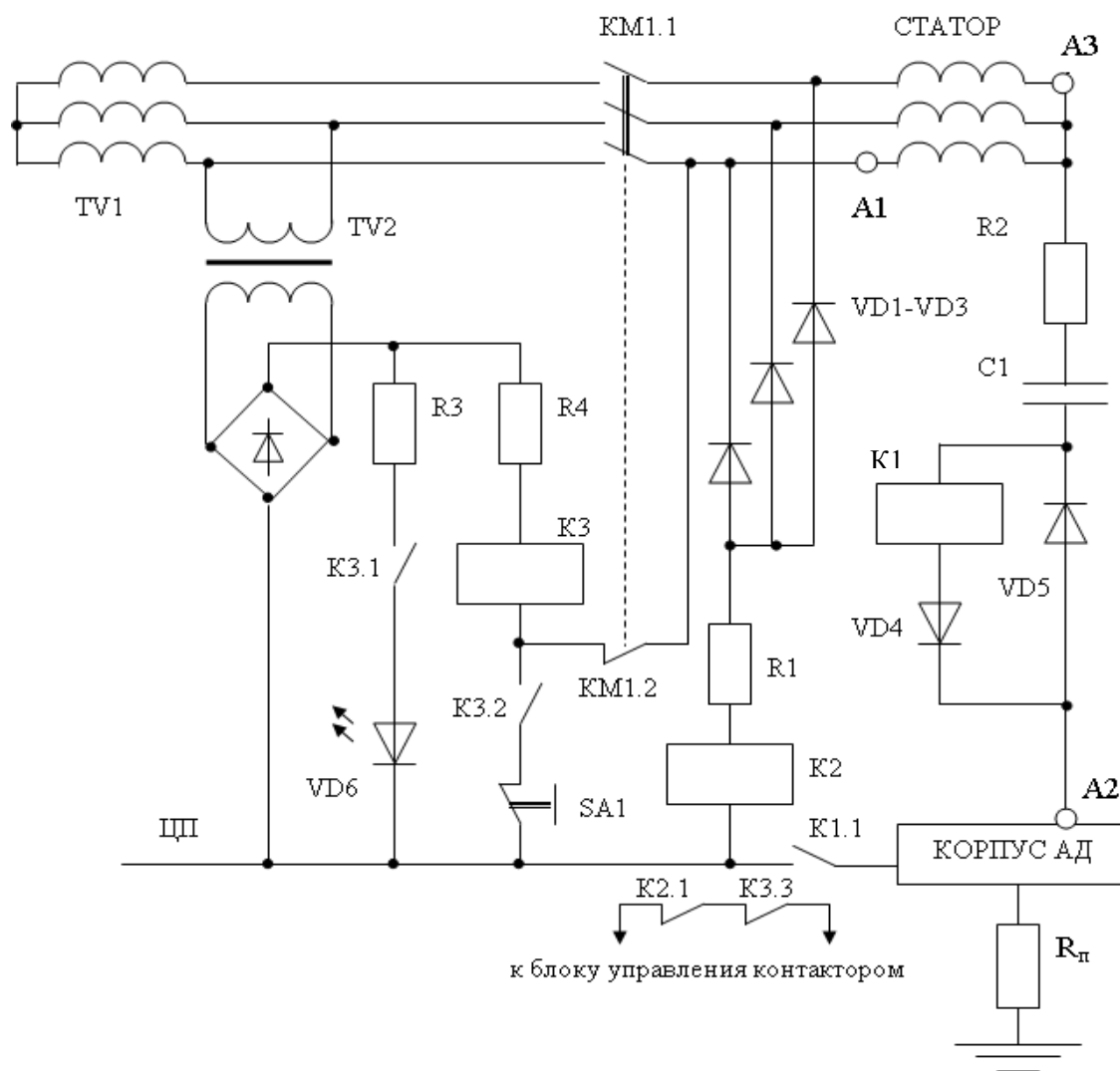


Рисунок 3.10 – Схема, устройства защитного автоматического блокирующего отключения рудничного АД при отсутствии заземления его корпуса

контакта между точками «А1 и «А2» конкретного присоединения.

Вследствие наличия обратной ЭДС АД, перешедшего в состояние выбега, и при условии наличия контакта между «А1» и «А2», реле К1 останется во включенном состоянии на время, достаточное для срабатывания реле К3 БРУ

(цепь оперативного тока: «+» выпрямителя $VC1 \rightarrow R3 \rightarrow K3 \rightarrow KM1.2 \rightarrow \langle A1 \rangle$ (фаза сети) $\rightarrow \langle A2 \rangle$ (корпус АД) $\rightarrow K1.1 \rightarrow \langle - \rangle$ выпрямителя $VC1$). Для задержки отпускания реле $K1$ параллельно его обмотке может быть присоединён конденсатор. В этом случае напряжение на резисторе ΣR , что соответствует сопротивлению последовательного соединения $R2$ и $K2$ по рисунку 3.10, будет также описываться выражениями (3.3, 3.4) при условии, что в числителе формулы (3.5) амплитуда напряжения сети будет заменена на амплитудные значения ЭДС вращения АД (убывающей по величине с постоянной времени T_p) в соответствии с выражениями (3.6, 3.7). При возникновении данного состояния дальнейшая работа пускателя АД автоматически блокируется замыканием контактов $K3.1$, $K3.2$ и размыканием контакта $K3.3$ (в цепи управления контактором пускателя) реле $K3$. Деблокировка данного состояния осуществляется кнопкой $SA1$.

Обоснованные схема и параметры устройства автоматического защитного блокирующего отключения АД многомашинного электротехнического комплекса при отсутствии заземления его металлического корпуса позволяют повысить эффективность эксплуатации шахтной участковой электрической сети, обустроенной в соответствии с концепцией исключения формирования составляющей электропоражающего фактора (частичной ёмкостной проводимостью изоляции между фазами сети и землёй). Представленное техническое решение согласуется с концепцией применения в локализованной структуре АД средства выявления контакта фазы с его незаземлённым металлическим корпусом.

3.5 Демонстрационная версия устройства защитного отключения силового присоединения в контексте практической реализации результатов исследований

Анализ концептуальной схемы устройства защитного отключения силового присоединения (Рисунок 3.7) позволяет сделать вывод о возможности её адаптации к функционированию в однофазной электрической сети напряжением 220 В, что создаёт возможность представления результатов исследований на уровне функционирующего макета в процессе работы профильных научно-технических конференций, выставок и т.п. Схема демонстрационной версии схемы устройства защитного отключения силового присоединения представлена на рисунке 3.11, а его компоновка и внешний вид - на рисунке 3.12.

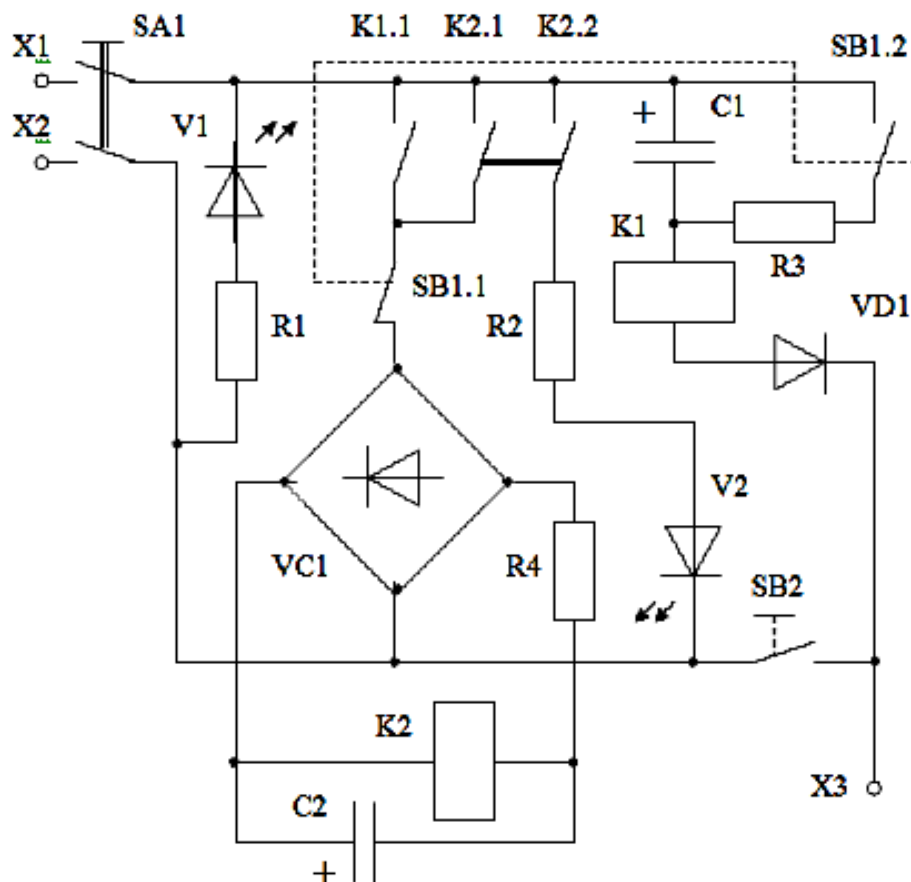


Рисунок 3.11 – Схема демонстрационной версии (адаптированной к функционированию в однофазной электрической сети) устройства защитного отключения силового присоединения

В соответствии с этой схемой, измерительная цепь представлена элементами C1, K1, VD1. При демонстрации работы устройства в однофазной сети переменного тока напряжения 220 В контакты «X1» и «X2» предназначены для подключения к этой сети. Контакт «X3» не задействован, изолирован и защищён от случайного прикосновения. При демонстрации выполнения устройством защитной функции выявления касания фазой сети металлического корпуса АД трёхфазной сети линейного напряжения 380 В (Рисунок 3.12б) контакты «X1» - «X3» предназначены для:

- «X1» - подключения к точке соединения в звезду («Y») фазных обмоток статора АД;
- «X2» - подключения к вводу одной из фазных обмоток статора АД;
- «X3» - присоединения к металлическому корпусу АД.

Кнопкой SB2 создаётся (имитируется применительно для варианта демонстрации в однофазной электрической сети) эффект соединения фазы сети с корпусом АД (электроустановки). Отработка команды защиты, формируемой реле K1, осуществляется включением реле K2, с самоблокировкой контактом K2.1.

Для деблокировки защиты (разряда конденсатора C1 через резистор R3 и отключения реле K2) предусмотрена кнопка SB1. В схеме устройства предусмотрена светодиодная индикация о наличии напряжения на входе и защитном срабатывании реле K2 (светодиоды V1, V2, соответственно). Параметры элементов схемы: диоды VD1 - Д242; V1, V2 - BL-L813; выпрямитель VC1 - КЦ402 Б; конденсатор электролитический C1 - 50,0 мкФ / 400 В; C2 - 4,7 мкФ; реле K1 - 90-3747-10; реле K2 - РЭС-32 (РФ4500345); резисторы R1, R2, R4 - 13 кОм; R3 - 82 Ом.

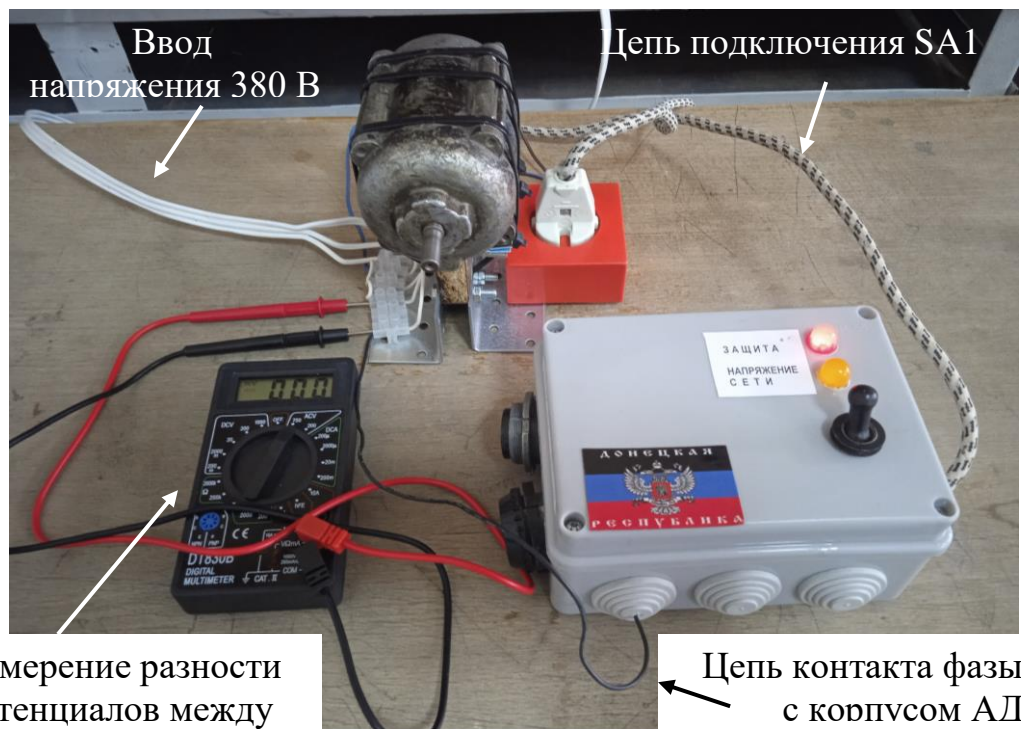
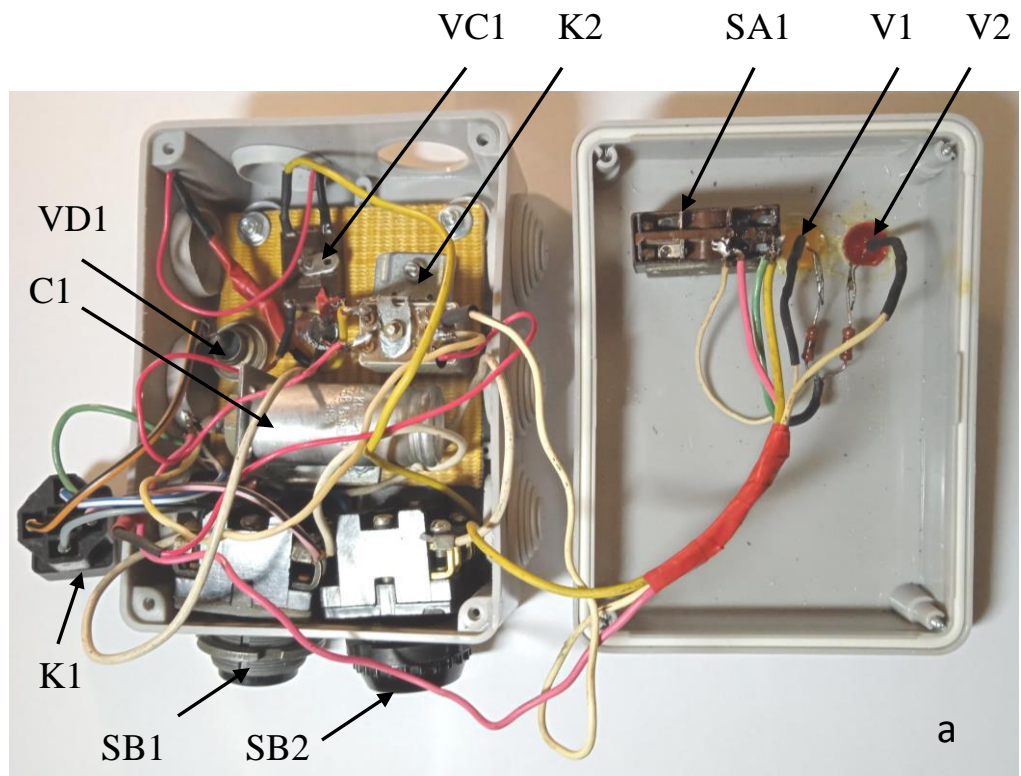


Рисунок 3.12 – Устройство защитного отключения силового присоединения (демонстрационная версия): компоновка (а); функционирование в стенде имитации контакта фазы с корпусом АД (б)

3.6 Синтез структуры комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений при его оснащении устройствами выявления контакта фазы с объектом защиты

Разработанные технические решения в области выявления контакта фазы электрической сети с объектом защиты (с целью его последующего отключения) могут быть применены в структуре «магнитный пускатель - асинхронный двигатель», а также адаптированы к применению в схемах силовых коммутационных аппаратов, дополняя и развивая, тем самым структуру комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений (Рисунок 3.13) [94].

Отсутствие функциональной взаимосвязи между применяемыми, а также, применяемыми и вновь вводимыми (выделены серым фоном) техническими средствами выявления аварийных (опасных) состояний и управления защитным отключением силовых присоединений не позволяет отнести данную структуру к категории «систем» управления автоматическим защитным отключением контролируемых объектов. Однако компоновка и реализуемые функции вновь вводимых технических средств соответствуют критериям, предъявляемым к устройствам (системам) управления, в данном случае, - автоматического управления отключением объекта защиты при возникновении его аварийного (опасного) состояния [95]. Это подтверждается совокупностью процедур, выполненных в процессе их синтеза:

- определение назначения технического средства;
- определение состояния объекта, отвечающего условию формирования управляющей функции;
- определение величины возмущающего параметра, достаточной для приведения в действие реагирующего органа;
- определение вариантов реагирующих органов и типов исполнительных устройств;
- обоснование принципа формирования управляющей функции.

По своей сути R-C-VD- цепи этих технических средств являются датчиками (ДК) контакта фазы с объектом защиты, присоединяемыми к сети непосредственно (к точке соединения в «звезду» обмоток статора АД), либо подключением к точке нулевого потенциала (соединения в «звезду») элементов присоединения к фазам сети (Рисунки 2.6 б, 2.7, 3.4, 3.7, 3.10). При этом электромагнитные реле, подключаемые своими обмотками последовательно к R-C-VD- цепям, выполняют функцию реагирующего устройства, входящего в структуру устройства защитного отключения силового присоединения при контакте фазы с ЦП кабеля (УЗО1), либо при контакте фазы с металлическим корпусом объекта (УЗО2).

Отличительной особенностью системы «магнитный пускатель – асинхронный двигатель» является применение каскадного принципа управления защитным отключением силового коммутационного аппарата, где при возникновении контакта фазы с корпусом АД предусмотрена промежуточная операция присоединения к этому корпусу ЦП кабеля электропитания, имитации, тем самым, эффекта контакта фазы с ЦП кабеля и приведения в действие УЗО1.

Ввиду применения короткого отрезка кабеля (кабельной перемычки), соединяющего групповой автоматический выключатель с пускателями распределительного пункта участка, и малой вероятности повреждения его изоляции, в применении структуры «ДК-УЗО1» в схеме этого выключателя отсутствует необходимость.

Схема (Рисунок 3.13) поддерживает функционирование участковой автоматической защиты от утечек тока на землю (АЗ), реагирующей на возникновение цепи утечки между фазой (фазами) сети и землёй, поскольку отделением от заземления ЦП силовых кабелей не создаётся эффект полного подавления ёмкостной составляющей проводимости изоляции и не в полной мере, в связи с этим, подавляется электропоражающий фактор. Комплексные сопротивления изоляции сети представлены на схеме элементами $Z_{из}$.

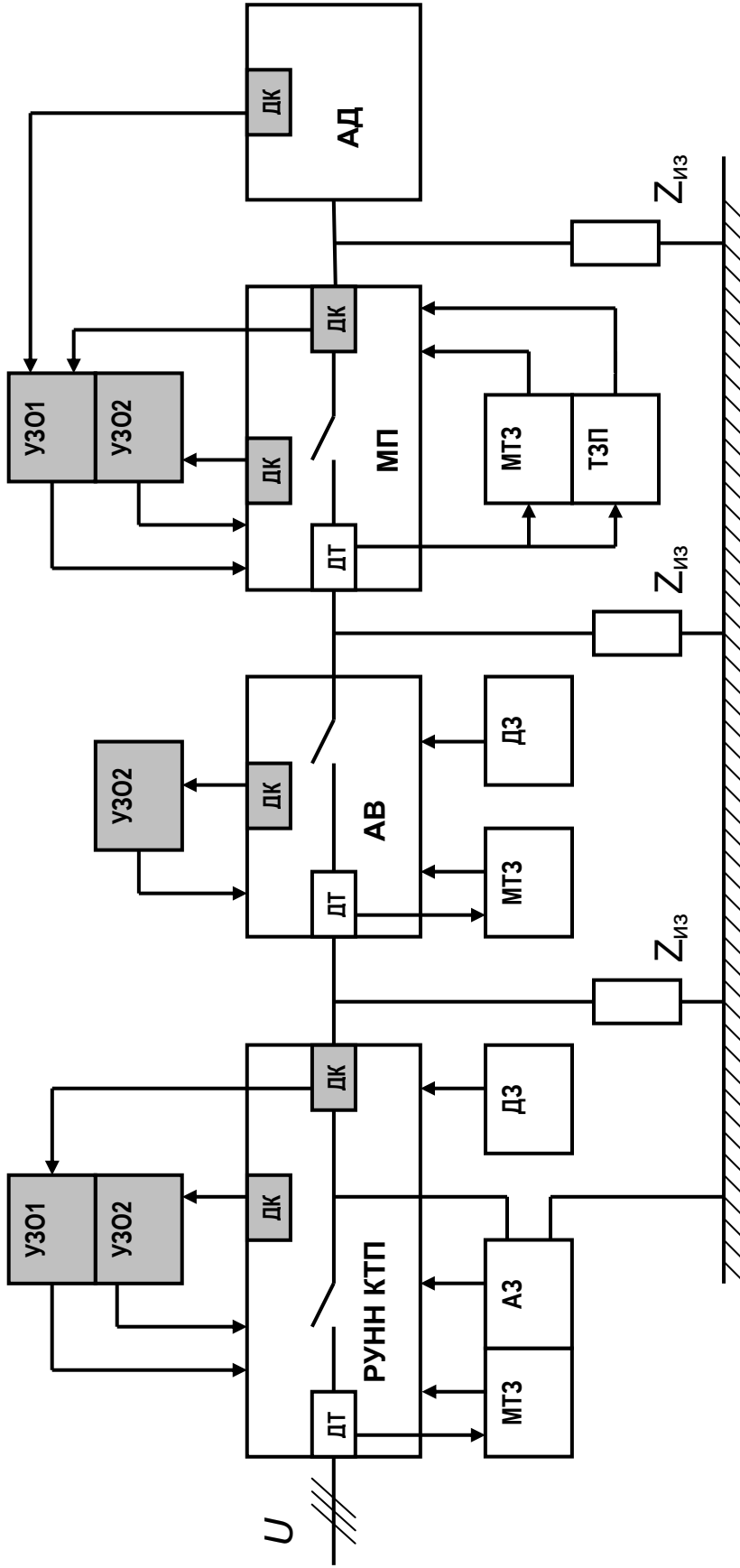


Рисунок 3.13 – Структура комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений электрической сети участка шахты: МТЗ - максимальная токовая защита; АЗ -автоматическая защита от утечек тока на землю; ТЗП - токовая защита от перегрузки АД; ДЗ - внешние дополнительные устройства защиты (при наличии); ДТ - датчик тока; ДК - датчик контакта фазы с объектом защиты; УЗО - устройство защитного отключения: 1 - при контакте фазы с ЦП кабеля; 2 - при контакте фазы с корпусом объекта

Методика проведения исследования состоит в следующем. На первом этапе:

- установление величины ёмкости R-C-VD-цепи, достаточной для включения реле (K1) в предположении, что активным сопротивлением этой цепи является обмотка данного реле;
- установление необходимости применения дополнительных средств (и их параметров), повышающих надёжность включения реле K1;
- установление необходимости (и параметров) применения токоограничивающего резистора в последовательной цепи обмотки реле K1.

На втором этапе, после определения приемлемых параметров R-C-VD-цепи, должны быть определены параметры цепи присоединения обмотки реле K2 (в структуре модели эта обмотка также представлена активным сопротивлением в соответствии с позициями таблицы 4.1), отвечающие критерию его надёжного включения.

3.7 Выводы по разделу 3

1) Установлен эффект надёжного выявления контакта фазного проводника трёхфазной электрической сети с нормально не присоединённым к ней электропроводящим объектом при подключении R-C-VD-цепи между точкой этого контакта и точкой нулевого потенциала (соединения в «звезду») функциональных элементов присоединения к фазам данной сети. При величинах номинального линейного напряжения трёхфазной электрической сети, составляющих 380 В; 660 В; 1140 В, электрические параметры (ток, напряжение), формируемые в R-C-VD-цепи, достаточны для приведения в действие реагирующего электромагнитного устройства при его подключении последовательно в R-C-VD-цепь. Амплитуды импульсов (полуволн) напряжения, формируемого на резисторе R-C-VD-цепи, находятся в логарифмической зависимости как от ёмкости этой цепи (при постоянной величине активного

сопротивления), так и от её активного сопротивления (при постоянной величине ёмкости).

2) Контакт фазного проводника трёхфазной электрической сети с металлическим корпусом АД может быть выявлен при локализации R-C-VD-цепи в структуре этого асинхронного двигателя подключением её между его корпусом и точкой соединения в «звезду» фазных обмоток статора.

3) Универсальность R-C-VD-цепи в контексте формирования информационного сигнала позволяет применить её в качестве измерительно-реагирующего устройства при локализации в структуре участковой комплектной трансформаторной подстанции, а также в структуре силового коммутационного аппарата (магнитного пускателя). Эффект защитного отключения силового присоединения (асинхронного двигателя) в случае контакта фазного проводника с его незаземлённым металлическим корпусом может быть достигнут воздействием реагирующего элемента R-C-VD-цепи, локализованной в структуре асинхронного двигателя, на R-C-VD-цепь, локализованную в структуре коммутирующего его магнитного пускателя кратковременным присоединением к корпусу этого двигателя центрального провода кабеля электропитания, изолированного от заземления и электрически связанного с R-C-VD-цепью магнитного пускателя.

4) Установлено, что при наличии малых переходных сопротивлений между землёй и не присоединёнными к заземлению металлическими корпусами асинхронных двигателей многомашинного электротехнического комплекса, оснащёнными средствами автоматической защиты на основе применения локализованных R-C-VD-цепей, в случае контакта фазы с металлическим корпусом одного из двигателей возможно защитное отключение смежных с ним двигателей. В этом случае селективность выявления аварийного присоединения может быть достигнута присоединением цепи, реализующей функцию блокировочного реле утечки, между фазным проводником на выходе магнитного пускателя и электрически связанным с R-C-VD-цепью этого пускателя изолированным от заземления центральным проводом кабеля электропитания асинхронного двигателя.

5) Локализуемая в структуре электротехнического устройства R-C-VD-цепь как средство выявления контакта фазного проводника с его металлическим корпусом может быть адаптирована к технической реализации в демонстрационной версии, включая применение в однофазной сети переменного тока.

РАЗДЕЛ 4

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Корректировка схемы и обоснование параметров компонентов средства защитного отключения при локализации датчика контакта фазы в структуре асинхронного двигателя

Работоспособность схемы по рисунку 3.7 подтверждена результатами исследований макета (Рисунок 3.11, Рисунок 3.12), что позволяет определиться с приемлемыми типами электромагнитных реле К1 и К2 (90.3747-10 и РЭС-32, соответственно). Будучи предназначенным для эксплуатации в электрооборудовании автомобиля, реле 90.3747-10 адаптировано к условиям значительных динамических нагрузок (тряска, вибрация), большого диапазона температуры окружающей среды (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$), имеет степень защиты IP 44. Его номинальный ток коммутации составляет 30А [96]. Это свидетельствует о надёжности коммутации электрической цепи с током в несколько десятков мА и потенциальной возможности применения данного реле в структуре рудничного асинхронного двигателя, работа которого также сопровождается тряской и вибрацией. Аналогично, и эксплуатационные параметры реле РЭС-32 согласуются с условиями его применения в структурах рудничных взрывозащищённых коммутационных аппаратов. Реле может эксплуатироваться в температурном диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, при высокой относительной влажности, в том числе, до 5 дней при относительной влажности до 98% и температуре $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, сохраняет вибропрочность и виброустойчивость в диапазоне частот от 15 до 50 Гц (при амплитуде колебаний до 1 мм). При расположении в защищённой от внешних воздействий аппаратуре его срок службы (в соответствии с паспортными данными) составляет не менее 12 лет.

При исследовании датчика контакта фазы представляется актуальным также определить:

- в каком диапазоне ёмкостей может находиться параметр $C1$ датчика контакта фазы (R-C-VD-цепи) в условиях эксплуатации в промышленной электрической сети;
- целесообразность применения токоограничительного резистора в схеме датчика контакта фазы, подключаемого последовательно с обмоткой реле $K1$, и параметры этого резистора;
- допустимый диапазон сопротивлений токоограничивающего резистора в цепи подключения обмотки реле $K2$ к фазам сети в условиях применения кабеля электропитания АД большой протяжённости.

Необходимость учёта параметров кабеля большой протяжённости обусловлена эффектом формирования потери напряжения на активном сопротивлении его центрального провода в условиях присоединения его к корпусу АД контактом $K1.1$ при срабатывании реле $K1$ датчика контроля контакта фазы. Поскольку площадь сечения ЦП в кабелях, рассчитанных на высокие номинальные токи, составляет 10 мм^2 , введём допущение, что величина его удельного активного сопротивления равна величине удельного активного сопротивления фазного провода кабеля марки КГЭШ 3×10 и составляет: $R_{\text{уд}} = 1,96 \text{ Ом/км}$. Поскольку ЦП в кабеле не свит в спираль, его индуктивностью можно пренебречь. Актуальность представляют процессы при длине кабеля электропитания АД от 300 м до 400 м.

Компьютерная модель объекта исследования (Рисунок 4.1) соответствует схеме (Рисунок 3.10). В ней введены параметры обмоток статора рудничного АД типа 2ЭКВ4УС2, активная мощность которого составляет 220 кВт, что является средним по величине мощностным показателем электромеханического оборудования участка шахты. Параметры электросети: линейное напряжение 660 В, частота 50 Гц, число фаз - 3. Исходные данные для моделирования сведены в таблицу 4.1. Сопротивления обмоток реле $K1$, $K2$ и ЦП кабеля представлены резисторами R_{K1} , R_{K2} , $R_{\text{ЦП}}$.

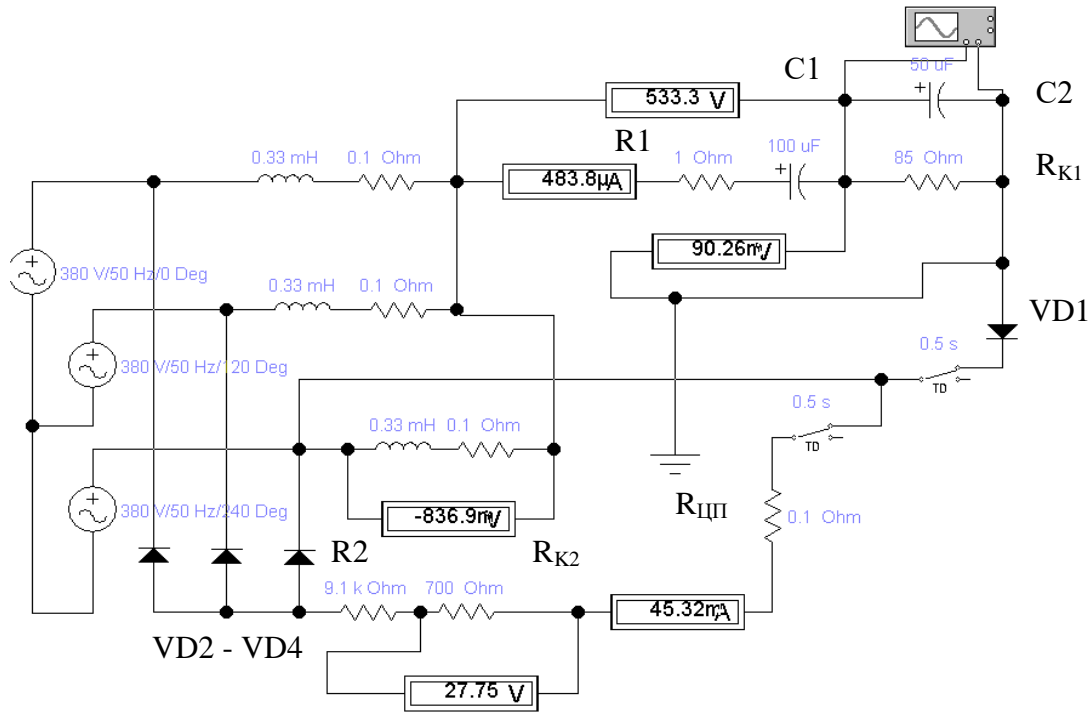


Рисунок 4.1 – Структура компьютерной модели объекта исследования

На рисунке 4.2 представлены осциллограммы напряжений на сопротивлении R_{K1} обмотки реле K1 (R-C-VD-цепи), полученные в ходе исследования модели (Рисунок 4.1) [94, с. 86-97]. Параметры элементов модели, соответствующие этим осциллограммам, приведены в таблице 4.2.

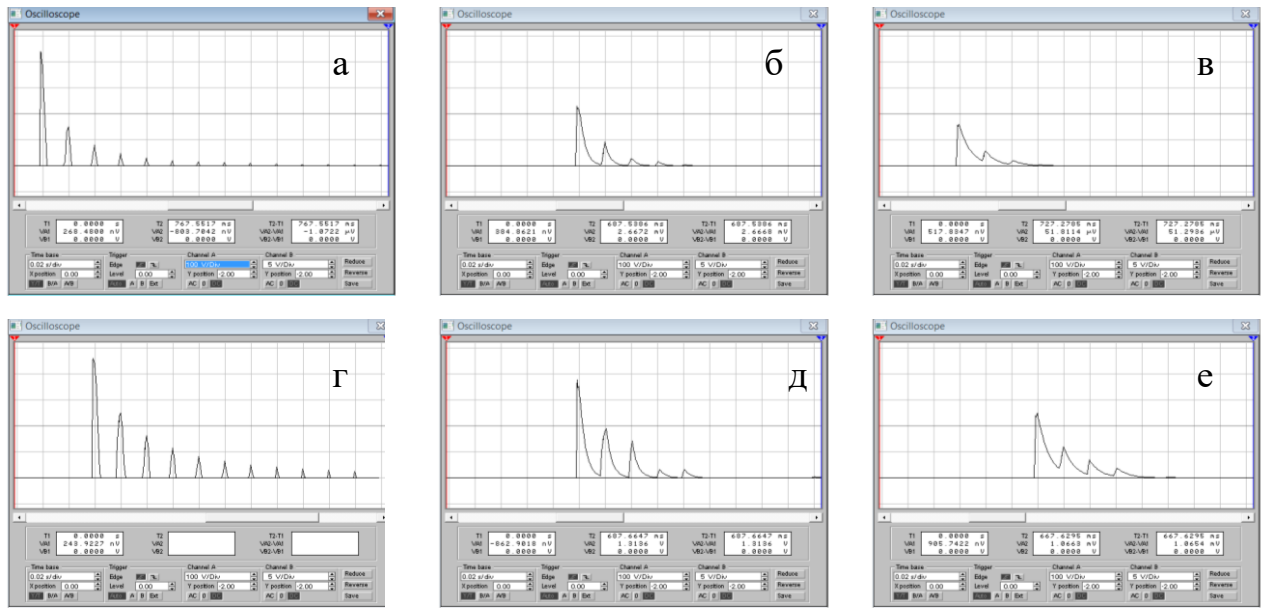
В ходе исследования определены параметры объекта, достаточные для надёжного включения реле K1 в структуре R-C-VD-цепи [97]. В контексте соответствия критерию надёжности включения реле K1 введено допущение, что в течение обусловленного паспортными данными времени включения ($t_{\text{вкл.}} \geq 15 \text{ мс} \approx 8$ периодов сети) напряжение на его обмотке не должно быть ниже напряжения включения (8 В). При этом необходимо учесть, что при отсутствии конденсатора C2, подключаемого параллельно обмотке реле K1 (R_{K1}) напряжение на этой обмотке представляется импульсами синусоидальных полуволн, убывающих (по мере заряда конденсатора C1) с постоянной времени $\tau_1 = k_{\text{п}} R_{K1} C1$ (Рисунок 4.2 а, г), где $k_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности. Амплитуда импульса первой полуволны U_{m1} (конденсатор C1 не заряжен) равна амплитуде напряжения, приложенного к R-C-VD-цепи в момент касания фазы сети с

корпусом АД. С целью снижения этой амплитуды последовательно в цепь обмотки реле К1 (R_{K1}) должен быть присоединён резистор R1, формируя цепь делителя напряжения $R_{K1}-R1$ (Рисунок 4.2 ж, к). В этом случае $\tau_1 = k_{\pi} (R_{K1}+R1) C1$.

Таблица 4.1 – Параметры схемы (Рисунок 3.10), принятые при исследовании процесса контакта фазы сети с корпусом АД

Параметры асинхронного двигателя							
Наименование						Значение	
Активное сопротивление статора АД: R_s , Ом						0,090811	
Индуктивность статора АД: L_s , Гн						0,00032833	
Параметры электромагнитных реле							
Позиция в схеме	Тип	Сопротивление обмотки, Ом	Ток срабатывания, мА	Ток отпускания, мА	Рабочий диапазон напряжений ΔU , В	Время срабатывания, мс	Время отпускания, мс
K1	90.3747-10	73 ÷ 87	95 ÷ 110	17÷ 65	8÷ 12	15	10
K2	РЭС-32 (...341)	175	36	8	11÷ 13		8
	РЭС-32 (...342)	650	20	4	21÷ 26		
	РЭС-32 (...343)	700	21	3	27÷ 33		
	РЭС-32 (...344)	2500	11		43÷ 52		
	РЭС-32 (...345)	2800		2	54÷ 66		

Масштаб: 100 В / деление шкалы:



Масштаб: 50 В / деление шкалы:

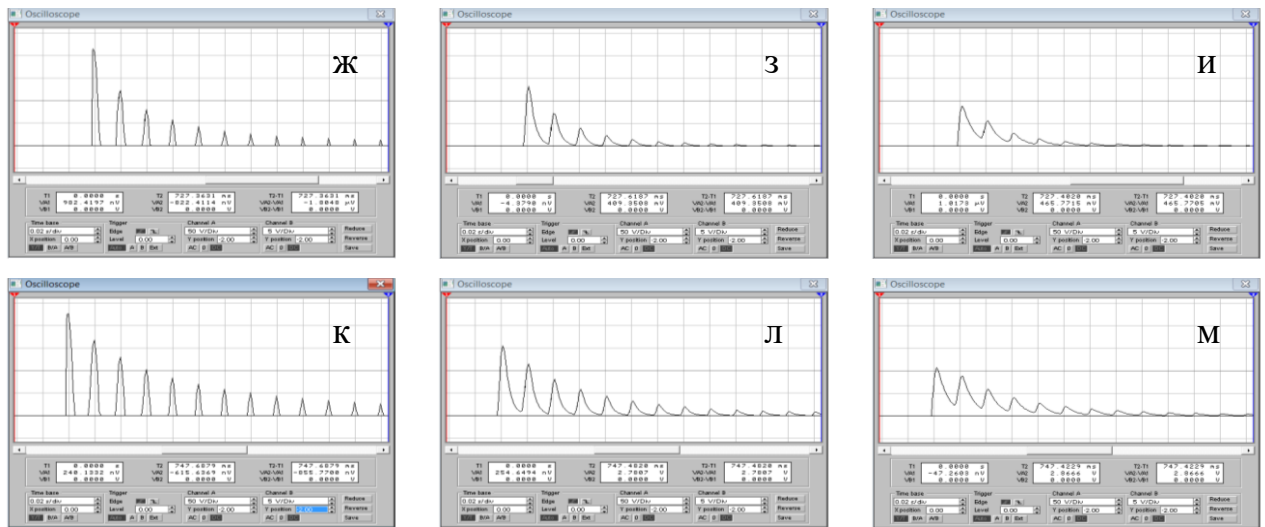


Рисунок 4.2 – Осциллограммы напряжений на сопротивлении R_{K1} обмотки реле К1 (R-C-VD- цепи); масштаб времени - 0,02 с/деление шкалы

Таблица 4.2 – Параметры модели (Рисунок 4.1), соответствующие осциллограммам «а» - «м» (Рисунок 4.2)

Функциональный элемент	Величина параметра											
	Индекс осциллограммы											
	а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м
$R_{K1}, \text{ Ом}$	85											
$C1, \text{ мкФ}$	50	50	50	100	100	100	50	50	50	100	100	100
$C2, \text{ мкФ}$	-	50	100	-	50	100	-	50	100	-	50	100
$R1, \text{ Ом}$	0						100					
$R_{K2}, \text{ Ом}$	700											
$R_{ЦП}, \text{ Ом}$	0,1											
$R2, \text{ Ом}$	1000											

Учёт коэффициента пропорциональности k_{π} обусловлен тем, что к конденсатору $C1$ R-C-VD-цепи в случае контакта фазы с корпусом АД прикладывается не постоянное напряжение (когда $k_{\pi} = 1$), а импульсы – полуволны синусоид напряжения, следующие с частотой сети ($f_c = 50$ Гц) с интервалами, равными половине периода. Таким образом, можно допустить, что на каждом интервале ΔT полуволны к конденсатору $C1$ приложено действующее напряжение:

$$U = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_n}^{t_k} u^2 dt} \quad , \quad (4.1)$$

где t_n ; t_k - моменты начала и окончания интервала времени
 $\Delta T = 1/2f_c = 0,01$ с,

u - мгновенная величина напряжения, приложенного к конденсатору $C1$ R-C-VD- цепи. В этом случае на каждом интервале ΔT будет последовательно накапливаться заряд конденсатора $C1$, представляемый фрагментами экспоненты:

$$U_c = U_{m1} (1 - e^{-t/\tau}) \quad , \quad (4.2)$$

где $\tau = R_{K1} C1$, U_{m1} - амплитуда напряжения u_1 (мгновенное значение), приложенного к R-C-VD- цепи.

Из допущения, что на интервале между полуволнами напряжения, прикладываемого к конденсатору $C1$, его заряд не снижается, следует, что в формуле постоянной времени заряда этого конденсатора коэффициент пропорциональности должен быть принят равным $k_n = 2$, т.е. $\tau_1 = 2R_{K1} C1$ при отсутствии добавочного резистора $R1$ и $\tau_1 = 2(R_{K1} + R1) C1$ при его наличии.

По мере роста потенциала экспоненты заряда конденсатора $C1$ напряжение, прикладываемое к обмотке реле $K1$, будет представлено фрагментами синусоид напряжения, приложенного к R-C-VD-цепи, превышающими экспоненту напряжения заряда конденсатора $C1$, т.е. фрагментами синусоид (мгновенные значения: u_{K1}) напряжения, убывающими экспоненциально (с постоянной времени τ_1 при $k_n = 2$) по амплитуде и, по мере убывания, сокращающимися по продолжительности (t_n). В этом случае на интервале времени ΔT_Σ от начала до окончания процесса заряда конденсатора $C1$ имеет место закономерность увеличения скважности $s = T_t / t_n$ фрагментов полуволн импульсов напряжения, приложенного к обмотке реле $K1$ (где T_t - временной интервал, состоящий из продолжительности импульса фрагмента полуволны напряжения и следующей за ним паузы). Установлено, что на интервале ΔT_Σ коэффициент заполнения ($D=1/s$) импульсов (фрагментов) полуволн находится в убывающей линейной зависимости от числа n этих импульсов [94, с. 86-97]:

$$D = D_{max} - an \quad , \quad (4.3)$$

где $D_{\max} = t_{\text{пс}} / T_{\text{пер.}} = 0,5$ – коэффициент заполнения периода напряжения ($T_{\text{пер.}}$) сети его полуволной (длительностью $t_{\text{пс}}$). Так, для параметров, представленных на рисунке 4.2 г выражение (4.4) преобразуется к виду: $D = 0,5 - 0,036n$.

Этот эффект подтверждается осциллограммами (Рисунок 4.2 а, г, ж, к). В этом случае на каждом i -м интервале формирования импульсного (фрагменты полуволны синусоиды) входного напряжения, подаваемого на обмотку реле К1. Эффективная величина этого напряжения будет соответствовать выражению (4.5), что позволит вычислить среднее значение напряжения на обмотке реле К1 на временном интервале ΔT_{Σ} :

$$U_{K1} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \int_{t_{ni}}^{t_{ki}} u_{K1}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \int_{t_{ni}}^{t_{ki}} (u_1 - U_{m1}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}))^2 dt} \quad , \quad (4.4)$$

Существенное убывание по величине напряжения, прикладываемого к обмотке реле К1 и наличие расширяющихся по продолжительности пауз между импульсами полуволн этого напряжения являются факторами, препятствующими надёжному включению этого реле, а значительное превышение амплитудами первых импульсов напряжения u_{K1} , приложенного к обмотке реле К1, нормируемой величины напряжения его включения способно привести к отказу реле.

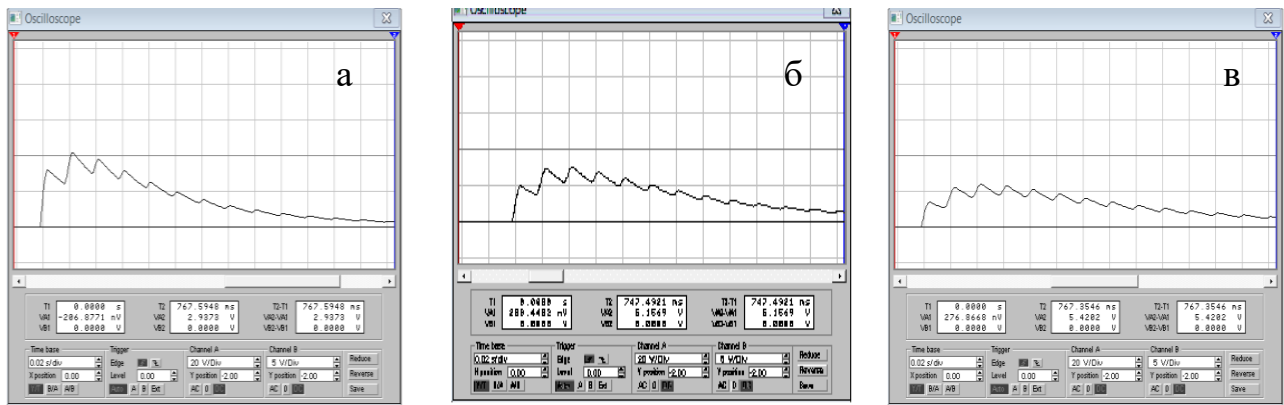
Надёжное включение реле К1 R-C-VD-цепи может быть обеспечено снижением амплитуд начальных импульсов напряжения, приложенного к его обмотке при одновременном сокращении пауз между этими импульсами. Этот эффект достигается подключением дополнительного конденсатора С2 параллельно обмотке реле К1. В этом случае соединённые последовательно конденсаторов С1 и С2 формируют цепь ёмкостного делителя напряжения с падениями напряжения на С1 и С2, обратно пропорциональными этим ёмкостям,

что подтверждается сопоставлением осциллограмм (Рисунок 4.2 а, б, в; Рисунок 4.2 г, д, е). При этом присоединение дополнительной ёмкости C_2 параллельно обмотке реле K_1 создаёт эффект «растягивания» задних фронтов импульсов напряжения вследствие чередующихся разрядов конденсатора C_2 , что для каждого i -го интервала между амплитудой входного импульса напряжения ($U_{m\text{ вх.}i}$) и началом формирования фрагмента синусоиды - следующего входного импульса напряжения описывается выражением:

$$U_{c2} = U_{m\text{ вх.}i} e^{-t/\tau_2} , \quad (4.5)$$

где $\tau_2 = R_{K1}C_2$, t - текущее время интервала формирования спадающей экспоненты напряжения на конденсаторе C_2 и обмотке реле K_1 . Процесс иллюстрируется осциллограммами (Рисунок 4.2 б, д; Рисунок 4.2 з, л).

Таким образом, в случае присоединения конденсатора C_2 параллельно к обмотке реле K_1 напряжение на этой обмотке будет сформировано из отрезков, описываемых выражениями (4.4) и 4,5), соответственно, на интервалах от начала до амплитуды фрагмента синусоиды и от этой амплитуды до начала следующего фрагмента синусоиды. Среднее значение напряжения, приложенного к обмотке реле K_1 R-C-VD- цепи может быть повышено при увеличении постоянной времени τ_2 разряда конденсатора C_2 . Это достигается увеличением его ёмкости при $R_{K1} = \text{const}$ (сопоставление рисунков: 4.2 б, в; 4.2 д, е; 4.2 з, и; 4.2 л, м). Установлено, что величина напряжения, приложенного к обмотке реле K_1 типа 90.37747-10, удовлетворяющая критерию его надёжного включения, применительно к сети линейного напряжения 660 В, может быть получена при $100 \text{ Ом} \leq R_1 \leq 300 \text{ Ом}$, $C_1 = 100 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 500 \text{ мкФ}$ (Рисунок 4.3) [98].



$R1 = 100 \text{ Ом}$

$R1 = 200 \text{ Ом}$

$R1 = 300 \text{ Ом}$

Рисунок 4.3 – Осциллограммы напряжений на обмотке реле типа 90.3747-10 при моделировании процессов в сети линейного напряжения 660 В, формируемых при условии присоединения резистора $R1$ (Рисунок 4.1) последовательно с обмоткой реле и конденсатора $C2 = 500 \text{ мкФ}$ - параллельно этой обмотке; масштабы: 20 В/деление шкалы; 0,02 с/деление шкалы

С целью задержки отпускания реле $K1$ на время, достаточное для блокировки отключенного состояния контактора коммутационного аппарата ёмкость конденсатора $C2$, подключаемого параллельно его обмотке может быть увеличена. Так при $C2 = 1000 \text{ мкФ}$ и $R1 = 300 \text{ Ом}$ продолжительность величины напряжения на обмотке реле $K1$, достаточной для его включения будет составлять не менее 0,4 с (Рисунок 4.4.), что достаточно для выполнения блокирующей процедуры.

Параметры датчика контакта фазы (на основе R-C-VD- цепи) не оказывают влияние на величину напряжения на обмотке реле $K2$ (представленной резистором R_{K2}) исполнительного устройства, локализованного в силовом коммутационном аппарате. Коррекция величины этого напряжения осуществляется сопротивлением резистора $R2$, включенного последовательно между R_{K2} и общей точкой соединения диодов $VD2 - VD4$, обеспечивающих присоединение к фазам сети. Величина активного сопротивления $R_{ЦП}$ ЦП кабеля электропитания существенно ниже сопротивлений делителя напряжения $R_{K2} - R2$ и на величину напряжения на обмотке реле $K2$ влияния не оказывает.

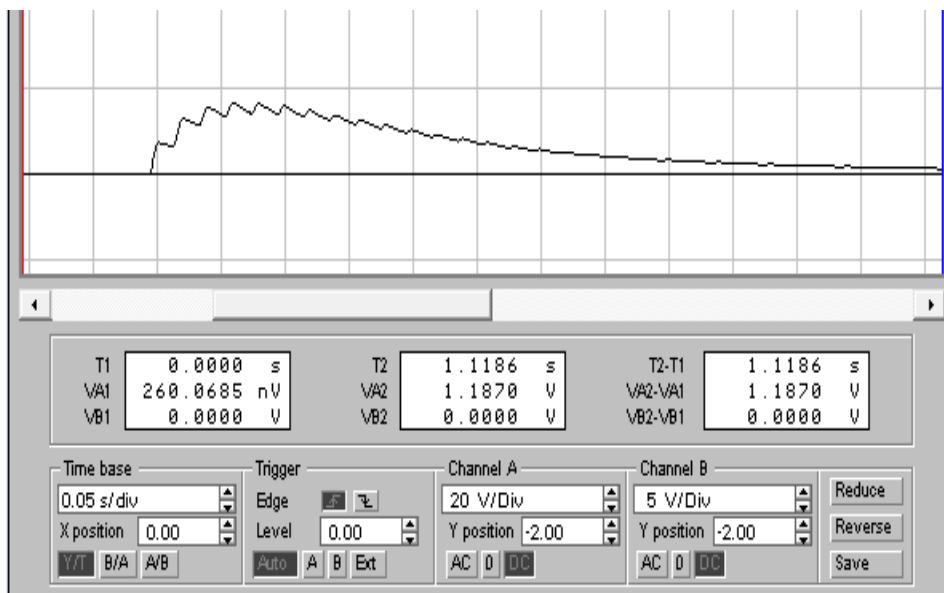


Рисунок 4.4 – Осциллограмма напряжения на обмотке реле типа 90.3747-10 при моделировании процессов в сети линейного напряжения 660 В, формируемых при условии присоединения резистора $R1 = 300$ Ом (Рисунок 4.1) последовательно с обмоткой реле и конденсатора $C2 = 1000$ мкФ - параллельно этой обмотке.; масштабы: 20 В/деление шкалы; 0,05 с /деление шкалы.

4.2 Разработка схем присоединения устройств выявления контакта фазы с объектом контроля к узлам управления силовыми коммутационными аппаратами

В соответствии с разработанной схемой (Рисунок 3.7) предусмотрен релейный выходной узел устройства выявления контакта фазы с объектом контроля. При этом, действие этого устройства может быть распространено:

- на автоматические выключатели распределительных устройств низшего напряжения (РУНН) участковых КТП;
- на групповые автоматические выключатели (аппараты серии АВ) распределительных устройств участков шахты;
- на магнитные пускатели, дистанционно осуществляющие включение/отключение асинхронных двигателей.

В соответствии с этим, адаптация устройства выявления контакта фазы с объектом контроля к узлам управления силовыми коммутационными аппаратами

предполагает разработку вариантов соответствующих схемных решений. В частности, отключение автоматического выключателя серии А37ХХ, применяемого в структуре РУНН КТП и в аппаратах серии АВ, может быть осуществлено замыканием цепи питания их независимых расцепителей YU1 (Рисунок 4.5,а).

В связи с этим, исполнительное реле К2 (по рисунку 3.7) должно быть оснащено замыкающим контактом К2.2, подключаемым к цепям присоединения замыкающих контактов К1.1; К3.1 исполнительных элементов, соответственно, автоматической газовой защиты (АГЗ) и автоматической защиты от утечек тока на землю (АЗ) - к выводам 3, 4 (Рисунок 4.5 а). Контакты К2.2 реле К2 должны быть рассчитаны на коммутацию постоянного (выпрямленного) тока 1,5 А при напряжении 110 В питания независимого расцепителя YU1, формируемого на выходе трансформатора TV1. Это согласуется с коммутационными возможностями принятого типа реле (РЭС-32) К2, коммутируемый ток которого находится в пределах $0,003 \div 3,00$ А.

При оснащении автоматического выключателя нулевым расцепителем (Y0), структура РУНН КТП, а также структура АВ дополняется блоком защитного отключения (БЗО), управляемым нажатием кнопки «СТОП» SB1 (Рисунок 4.5 б) присоединённого кнопочного поста. В этом случае защитное отключение автоматического выключателя при выявлении контакта фазы с объектом контроля может быть осуществлено при подключении размыкаемого контакта К2.1 (Рисунок 3.7) реле К2, присоединяемого последовательно между клеммой 1 БДУ и цепью кнопки «СТОП» SB1 кнопочного поста. Коммутируемый ток цепи кнопочного поста, оснащённой элементами искрозащиты, при напряжении переменного тока 18 В также соответствует параметрам выбранного реле РЭС-32.

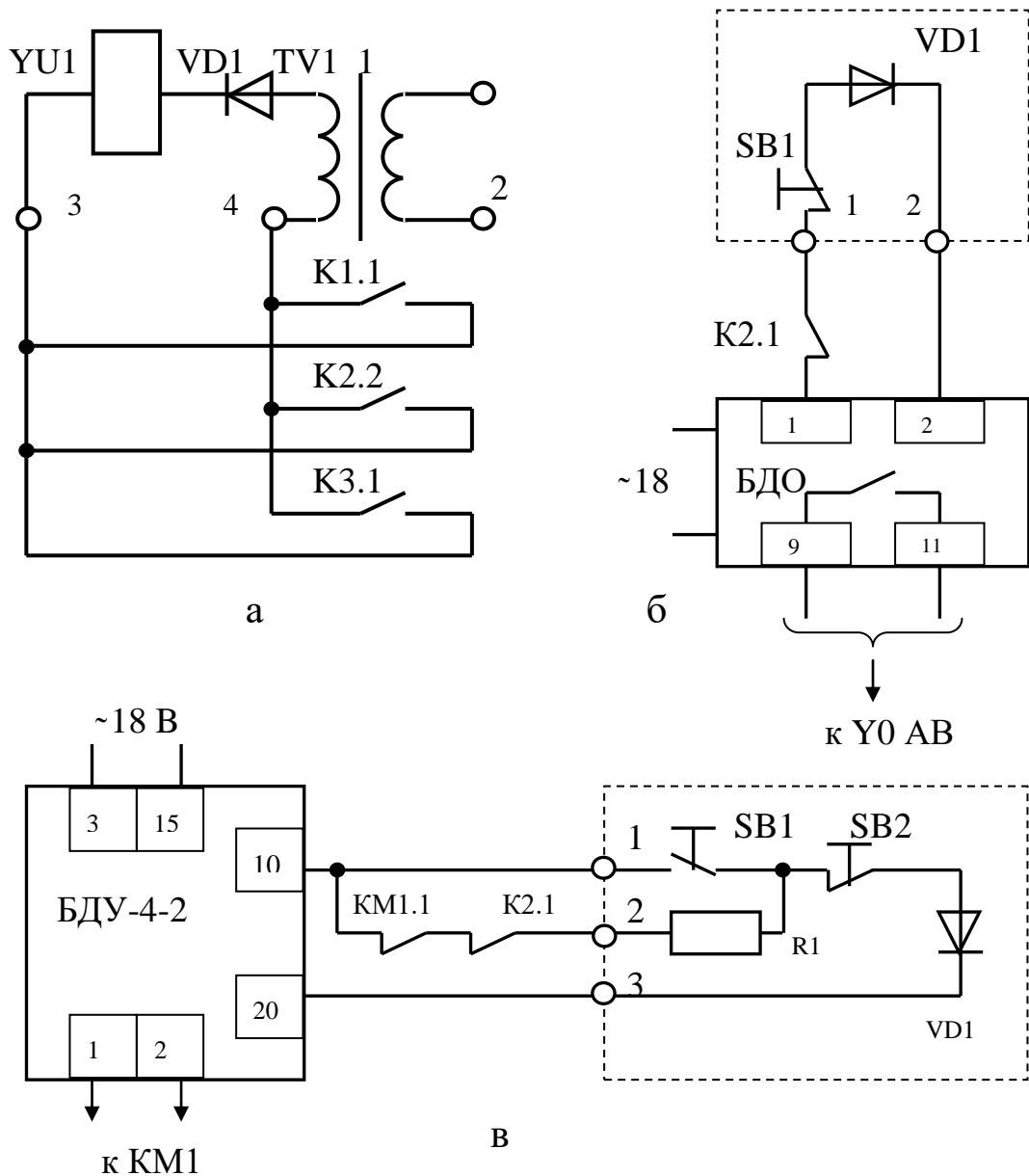


Рисунок 4.5 – Варианты схем подключения контактов К2.1; К2.2 реле К2 (по рисунку 3.7) устройства выявления контакта фазы с объектом контроля к цепям: независимого расцепителя автоматического выключателя А37ХХ (а); блока защитного отключения (БДО) автоматического выключателя серии АВ (б); блока дистанционного управления (БДУ) контактором магнитного пускателя (в)

Применительно к структуре шахтного магнитного пускателя, адаптация устройства выявления контакта фазы с объектом контроля представляет функцию разъединения цепи между кнопочным постом (кнопки «ПУСК» SB1, «СТОП» SB2) и блоком дистанционного управления (БДУ) контактором КМ1 пускателя (Рисунок 4.5,в). На схеме, размыкаемый контакт К 2.1 присоединён последовательно в цепь размыкаемого слаботочного контакта КМ1.1 контактора, коммутирующего ток удержания (ограничиваемый резистором R1)

исполнительного реле БДУ-4-2 (наиболее распространённый в промышленности тип БДУ). Такое техническое решение может быть применено для других типов устройств дистанционного управления контакторами шахтных пускателей, в том числе, выполненных на основе применения микроконтроллеров (БДУ-Д) [99].

4.3 Адаптация функции предварительного контроля величины сопротивления изоляции кабеля к условиям локализации средств защитного отключения

Функция предварительного контроля величины сопротивления изоляции кабеля реализуется всеми типами силовых аппаратов дистанционного включения / отключения рудничных АД с целью блокировки подачи напряжения на кабель электропитания в случае снижения сопротивления его изоляции до предельно допустимой величины ($R_{из} = 30 \text{ кОм}$ в сети напряжения 660 В; $R_{из} = 50 \text{ кОм}$ в сети напряжения 1140 В) [6]. Действие средства предварительного контроля величины сопротивления изоляции (СКИ) кабеля в силовом присоединении коммутационного аппарата состоит в реакции на величину тока в цепи «фаза – земля»; «фаза – обмотка статора АД – земля» (Рисунок 4.6 а, где цепи утечки при повреждении изоляции кабеля обозначены пунктиром). В этом случае повреждение изоляции фазного проводника кабеля первоначально представляется его контактом с ЦП, а контакт фазы с землёй формируется вследствие присоединения ЦП к заземлению.

В условиях технической реализации альтернативной концепции построения системы электроснабжения (СЭС) участка шахты соединение ЦП кабеля с заземлением отсутствует. В этом случае функция предварительного контроля величины сопротивления изоляции кабеля в силовом присоединении, отходящем от коммутационного аппарата реализуется присоединением контакта «з» СКИ (изначально предназначенного для подключения к цепи заземления) – к ЦП контролируемого кабеля в отсеке кабельного ввода коммутационного аппарата

(Рисунок 4.6 б). Это позволит не нарушать параметры средства (СКИ) и повысить надёжность его функционирования, исключив зависимость от качества контакта ЦП с элементами заземления.

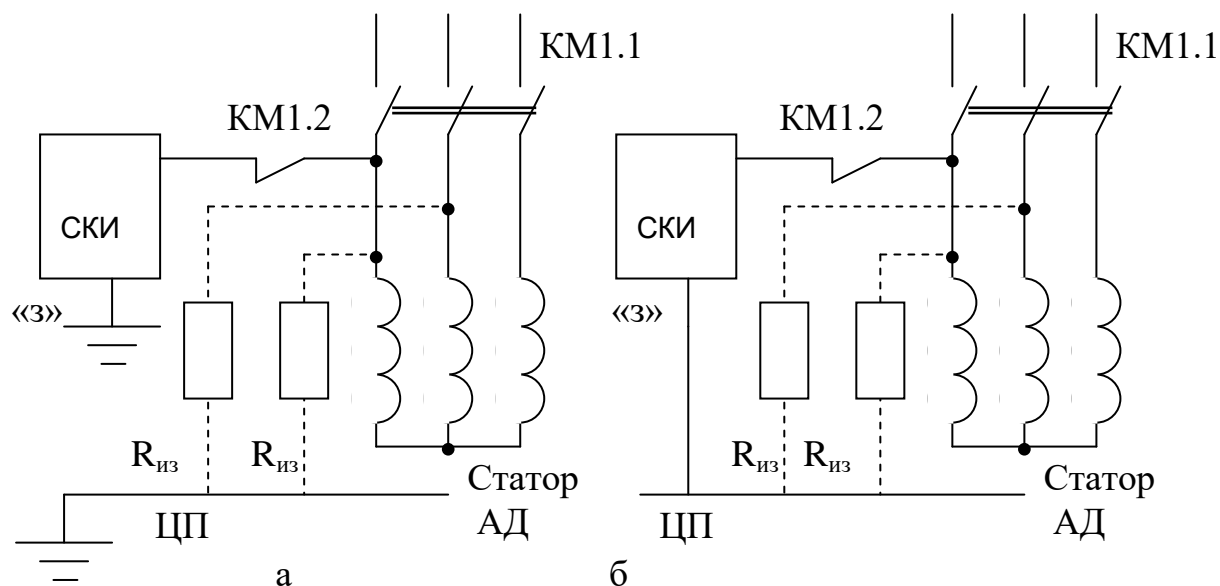


Рисунок 4.6 – Схема подключения средства контроля величины сопротивления изоляции кабеля силового присоединения коммутационного аппарата: а – базовый вариант; б – при реализации альтернативной концепции построения СЭС участка шахты

Воздействие СКИ на функциональность вводимых средств автоматического защитного отключения в штатном режиме эксплуатации исключается отключением СКИ от сети при включении контактора КМ 1.1 (размыканием контакта КМ 1.2 контактора).

4.4 Выводы по разделу 4

1) Установлено, что локализация устройства выявления контакта фазы с объектом контроля в структуре рудничного асинхронного двигателя может быть осуществлена при использовании в качестве управляемого коммутационного узла - электромагнитного реле, адаптированного к диапазону вибрации и рабочих температур, соответствующему условиям эксплуатации электромагнитных коммутационных элементов электрооборудования автомобилей и защищённого от

прямого попадания пыли и брызг воды (система защиты не ниже IP44). Определён тип электромагнитного реле R-C-VD- цепи, удовлетворяющий условиям эксплуатации в структуре рудничного асинхронного двигателя и требуемым коммутационным параметрам и параметра входного сигнала.

2) Выявлена закономерность изменения амплитуды импульсов напряжения на активных элементах R-C-VD- цепи в процессе контакта фазы сети с объектом контроля, установлен линейный характер роста пауз между импульсами напряжения, обоснована целесообразность применения и определены параметры конденсатора, подключаемого параллельно обмотке реле R-C-VD- цепи, при которых обеспечивается снижение амплитуды на начальном этапе формирования напряжения на обмотке реле при увеличении продолжительности уровня этого напряжения, достаточного для поддержания реле во включенном состоянии.

3) Подтверждена универсальность устройства выявления контакта фазы сети с объектом контроля в контексте его применения для управления защитным отключением рудничных коммутационных аппаратов вне зависимости от типов и схем управления перемещением их силовых контактов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика построения системы электроснабжения участка шахты состоит в комплектовании шахтной участковой электрической сети силовыми гибкими экранированными кабелями, в совокупности представляющими собой радиальную структуру присоединений, расходящихся от силовых коммутационных аппаратов к асинхронным двигателям потребителей. В результате, в электрической сети участка шахты формируются активные и в бóльшей степени ёмкостные проводимости изоляции, создающие пути утечки тока через тело человека в случае касания его к фазе сети, что представляет собой опасность его электропоражения. При этом, в среднем, порядка $1/3$ от общей ёмкостной проводимости кабеля приходится на ёмкость, формируемую между его центральным и фазными проводами. Поэтому способ заземления металлических корпусов асинхронных двигателей подключением их к заземлённым корпусам пускателей центральными проводами кабелей электропитания создаёт эффект значительного увеличения ёмкостной проводимости между фазами сети и землёй, повышая, тем самым, опасность поражения человека электрическим током.

Кроме этого, высокая ёмкостная проводимость изоляции является ограничительным фактором относительно области применения отдельных компонентов участковой автоматической защиты от утечек тока на землю и электропроводящей структурой, способствующей увеличению тока, циркулирующего в элементах заземления электрооборудования.

Указанные обстоятельства предопределили актуальность поиска альтернативного подхода к построению системы электроснабжения участка шахты, в соответствии с которым защитная функция при контакте фазы сети с металлическим корпусом асинхронного двигателя не была бы связана с использованием центрального провода кабеля электропитания в качестве заземляющего проводника, это позволило бы существенно снизить величину ёмкостной проводимости между фазами сети и землёй, подавляя, тем самым электропоражающий фактор, распространяя область применения защиты от

утечек тока на землю на участковые электрические сети, оснащённые силовыми кабелями повышенных сечений и протяжённости и снижая величину токов в элементах заземления. Техническое решение данной задачи возможно на основе применения средств автоматического выявления опасного состояния силового присоединения и его защитного отключения при их локализации непосредственно в структурах: «асинхронный двигатель - коммутационный аппарат».

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

Основные результаты работы состоят в следующем.

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

2) В условиях подключения центральных проводов шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям режим изолированной нейтрали трансформатора не является достаточным в контексте обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети. При этом функции применяемой защиты человека от электропоражения сводятся не к устранению электропоражающего фактора, а к ускорению отделения человека от энергетического потока трансформаторной подстанции в условиях постоянно действующего электропоражающего фактора, созданного вследствие заземления центральных проводов гибких кабелей.

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

4) Установлено, что факторами ограничения области эффективного функционирования устройства выявления фазы с цепью утечки тока на землю в структуре короткозамыкателя повреждённой фазы аппарата автоматической защиты от утечек тока на землю, действующего на основе определения минимальной из разности потенциалов между землёй и фазами электрической сети, являются ёмкость изоляции сети, превышающая 1.0 мкФ/фазу (электросети с потребителями высокой мощности), частота сети, превышающая 50 Гц (комбинированные электросети), сопротивление утечки, превышающее 1 кОм (нестабильность величины сопротивления тела человека).

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

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

6) Установлена возможность выявления контакта фазы с незаземлённым корпусом асинхронного двигателя при подключении измерительной цепи между корпусом и точкой нулевого потенциала фаз в цепи статора. Обоснован способ, структура и параметры устройства управления автоматическим защитным отключением коммутационного аппарата на основе выявления контакта «фаза - корпус», датчиком, локализуемым в асинхронном двигателе. Техническое решение защищено патентом Российской Федерации на изобретение.

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

8) Установлена возможность выявления места повреждения изоляции фазы шахтного гибкого экранированного кабеля при использовании его незаземлённого центрального провода в качестве проводника информационного сигнала измерительной цепи, и адаптации концептуальных положений петлевого метода к применению в условиях эксплуатации силового рудничного электрооборудования.

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВ	– автоматический выключатель;
АД	– асинхронный двигатель;
АЗ	– аппарат защиты от утечек тока на землю;
АК	– автоматический компенсатор;
ГБУ	– государственное бюджетное учреждение;
ГК	– гибкий кабель;
ГУ	– государственное учреждение;
УШ	– участок шахты;
ЭДС	– электродвижущая сила;
ЭТК	– электротехнический комплекс;
КА	– коммутационный аппарат;
к.з.	– короткое замыкание;
КЗПФ	– короткозамыкатель повреждённой фазы;
КМ	– контактор магнитный;
КТП	– комплектная трансформаторная подстанция;
МП	– магнитный пускатель;
ПЧ-ПТ	– преобразователь частоты со звеном постоянного тока;
РП	– распределительный пункт;
РУВН	– распределительное устройство высшего напряжения;
РУНН	– распределительное устройство низшего напряжения;
САУ	– система автоматического управления;
СВЭ	– система высоковольтного электроснабжения;
СЭС	– система электроснабжения;
ФГБОУ ВО	– федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования;
ЦП	– центральный провод;
ШИМ	– широтно-импульсный модулятор

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппараты защиты от токов утечки для сетей напряжением 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81Ю 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80 – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с.
2. Прогрессивные технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. Часть I. Технологические схемы / Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – Москва, 1979. – 333 с.
3. Кабели шахтные гибкие экранированные марки ГРШЭ: ГОСТ 10694-71 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/3P35.html>. – Загл. с экрана
4. Кабели силовые гибкие экранированные на напряжение 1140 В. Технические условия: ГОСТ 10694-78 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nrmssoft.ru/Doclist/doc/3A3R.html>. – Загл. с экрана.
5. Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля: ГОСТ 28298-89. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с. (Переиздание).
6. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд., перераб. И доп.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т.1.: (Гл.1-21). – 477 с.; Т.2.: (Гл.22-44). – 440 с.
7. Изоляция подземных электроустановок шахт и электробезопасность / Л. В. Гладилин, Б. Г. Меньшов, В. И. Щуцкий [и др.] ; под общей редакцией Л. В. Гладилина. – Москва : Недра, 1966 – 262 с.
8. Гуляева, И.Б. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения [Электронный ресурс] / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, О.А. Демченко // Вестник Донецкого национального технического

университета. Вып. 3(25) 2021, Донецк. – С. 34-47. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47556526_65042550.pdf – Загл. с экрана.

9. Денисова, Е.В. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения [Электронный ресурс] / Е.В. Денисова, И.Б. Гуляева, М.К. Маренич, // Горная промышленность №4 / 2022. – С. 110-118. – Режим доступа: https://mining-media.ru/images/2022/04_2022/110-118.pdf. – Загл. с экрана.

10. Бочаров, К.П. Эксплуатация электрооборудования участка шахты: монография / К.П. Бочаров, Б.Я. Стариков, З.М. Рабинович, М.А. Перепелюк. – Киев: Техника, 1982. –175 с.

11. Гуляев, Б.В. Взрывозащита и электробезопасность шахтных сетей: монография / Б.В. Гуляев. – Киев: Донецк: Высшая школа, 1985. – 138 с.

12. Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ.- Донецк, 2013.- 28 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itep.com.ua>. – Загл. с экрана.

13. Колосюк, В.П. Электробезопасность в горной промышленности: монография / В.П. Колосюк, Ю.В. Товстик; Под ред. В.П. Колосюка. – Донецк, Ноулидж (донецкое отделение), 2014. – 475 с.

14. Демченко, О.А. Безопасная схема высоковольтного электроснабжения / О.А. Демченко, Л.А. Муфель, В.Н. Стоян, А.Ю. Гладков, В.В. Диденко, В.А. Гаврилко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр./ МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2015. – №1(35). – С. 5 - 13.

15. Демченко, О.А. Способы локализации токов утечки в подземной высоковольтной кабельной сети / О.А. Демченко, А.П. Ковалёв, Л.А. Муфель // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр./ МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2015. – №4(39). – С. 5 - 13.

16. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь. Electrical apparatus for explosive atmospheres. Part 11. Intrinsic safety. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 30852.10-2002 (МЭК 60079-11:1999). МКС 29.260.20 Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103397?marker=7D20K3>. – Загл. с экрана.

17. Взрывоопасные среды. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». IEC 60079-11:2011 Explosive atmospheres — Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i» (IDT). ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Дата введения 2010-11-30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801459.pdf>. – Загл. с экрана.

18. Брюханов, А.М. Новая стратегия безопасности применения электроэнергии в шахтах / А. М. Брюханов, Л. А. Муфель, А. Б. Кац, А. А. Дубинский. // Уголь Украины. – 2012 – № 9 – С. 12–14.

19. Москалец, К.И. Методика расчёта частичных ёмкостей шахтных гибких кабелей / К.И. Москалец // Состояние изоляции шахтных кабельных сетей. Контроль изоляции и защита от утечек токаю Сборник статей под общ. ред. Л.В. Гладилина.- Москва: ЦНИИТЭИ угольной промышленности, 1963. – С. 47 - 58.

20. Внешний диаметр и масса кабелей марок КГЭШ, КГЭШТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bpks.ru/article/vneshniy-diametr-i-massa-kabeley-marok-kgesh-kgesht>. – Загл. С экрана.

21. Маренич, М.К. Ёмкость изоляции электросети участка шахты как фактор формирования тока в цепи заземления [Электронный ресурс] / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева, // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 3(29) 2022, Донецк. – С. 20-26. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_54809165_55662972.pdf – Загл. с экрана.

22. Чернышов, Н.Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: учебное пособие / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова/ Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 52 с.

23. Маренич, М.К. К вопросу обоснования новой концепции построения системы электроснабжения участка шахты /М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать девятая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (16-18 марта 2023 г., Москва), Тез. докл.- М., НИУ «МЭИ»: 2023. – С. 1210.

24. Лейбов, Р.М. Электрификация подземных горных работ: учебник для студентов, обучающихся по специальности "Электрификация и автоматизация горных работ" / Р. М. Лейбов, М. И. Озерной. - Москва : Недра, 1972. – 462 с.

25. Дзюбан, В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

26. Ягудаев, Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

27. Вареник, Е. А. Ограничение и защита от утечек тока в рудничных электроустановках напряжением 1200 В: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Вареник Евгений Александрович. - Днепропетровск, 2004 – 191 с.

28. Дзюбан, В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

29. Белошистов, А.И. Модернизация аппаратов защиты от токов утечки АЗУР-1 / А.И. Белошистов, А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий // Взрывозащищённое электрооборудование №1(52) ГУ НИИВЭ, Донецк, 2017. – С. 45 – 57.

30. Устройство и принцип работы АЗУР-4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://sinref.ru/000_uchebniki/01791shahtnoe_oborudov/084_apparat_zashiti_tokov_utechki_azur_4/004.htm. – Загл. с экрана.

31. Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП 28648513.004.РЭ. – Донецк, 2013.- 28 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: url: <https://itep.com.ua>. – Загл. с экрана.

32. Савицкий, В. Н. Новая серия аппаратов защиты от токов утечек на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В / В. Н. Савицкий, А. В. Савицкий // Уголь Украины. – 2013 – № 8 – С. 20–24.

33. Дзюбан, В. С. Исследование переходных процессов в шахтных участковых электрических сетях и их влияния на аппаратуру защиты от утечек : специальность 173 «Горная электромеханика»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дзюбан Виталий Серафимович; Донецкий политехнический институт. – Донецк, 1968 – 24 с.

34. Руссиян, С.А. Меры ограничения влияния коммутационных процессов на функционирование электротехнического комплекса шахтного участка: дис.. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Руссиян Станислав Анатольевич. – Донецк, 2012. – 186 с.

35. Синчук, О.Н. О проблеме электротравматизма при эксплуатации электроустановок в подземных горных выработках железорудных шахт /О.Н. Синчук, А.А. Харитонов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2014. – №2/10(68). – С 21 – 25.

36. Моркун, В.С. К вопросу анализа и оценки причин электротравматизма в условиях железорудных производств /В.С. Моркун, И.О. Синчук, А.А. Харитонов // Горный вестник, 2014. – Вып. 97. – С. 157 - 161.

37. Институт горного дела им. А. А. Скочинского Определение условий электробезопасности и эффективности различных способов компенсации ёмкостных токов в шахтных электрических сетях / под ред. Г. В. Миндели, Ю. П. Малышко. – Москва: ИГД им. А. А. Скочинского, 1966 – 37 с. : ил.

38. А.с. 670998 СССР, МПК H02J3/18 Устройство для автоматической компенсации ёмкостных токов утечки / В.С. Прудников, В.С. Дзюбан, А.И. Белошистов, Н.Н. Барилюк (СССР). – № 2590912/24-07; заявл. 17.03.1978; опубл. 30.06.1979, Бюл. 24.

39. А.с. 750647 СССР, МПК H02J3/18 Устройство для автоматической компенсации ёмкостной составляющей тока утечки / В.С. Прудников, В.С.

Дзюбан, А.П. Денисенко, В.М. Ильин (СССР), – №2577554/24-07; заявл. 13.02.1978; опубл. 23.07.1980, Бюл. 27.

40. А.с. 769676 СССР, МПК H02H9/08 Способ автоматической компенсации ёмкостного тока утечки / В.С. Прудников (СССР), – № 2653753/24-07; заявл. 07.08.1078; опубл. 07.10.1980, Бюл. 37.

41. А.с. 884030 СССР, МПК H02H9/08 Способ автокомпенсации ёмкостного тока утечки на землю в трёхфазной электрической сети/ В.С. Прудников (СССР). – № 2895361/24-07; заявл. 19.03.1980; опубл. 23.11.1981, Бюл. 43.

42. А.с. 1229897 СССР, МПК H02H9/08 Устройство автоматической компенсации ёмкостного тока утечки / В.С. Прудников, В.Ф. Костин, Ю.И. Слепцов (СССР). – № 3779860/24-07; заявл. 14.08.1984; опубл. 07.05.1986, Бюл. 17.

43. Гуляева, И.Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «АЗУР-1» / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич. – Вестник Донецкого национального технического университета, Вып 1 (27) 2022, Донецк. – С. 50-60. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_52081261_59499947.pdf – Загл. с экрана.

44. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко. – Москва: Энергия, 1975. – 184 с.

45. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента : учеб. пособ. / Г.М. Тимошенко, П.Ф.Зима. – Донецк, ДПИ, 1984. – 60 с.

46. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс; пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.А. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 598 с

47. Шарнопольская, О.Н. Новая концепция построения системы электроснабжения участка шахты как фактор повышения конкурентоспособности производства рудничного электрооборудования / О.Н. Шарнопольская, М.К. Маренич // Регионы России в меняющемся мире: преемственность приоритетов и новые возможности: сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 24 ноября 2023 г.) / гл. ред. Н. В. Морозова. – Чувашский гос.

ун-т им. И.Н. Ульянова, Чебоксары: Среда, 2023. – С. 186 - 193. Режим доступа: <https://phsreda.com/e-publications/e-publication-10550.pdf>. – Загл. с экрана.

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

49. Маренич, М.К. Ёмкость изоляции кабелей как компонент электропоражающего фактора / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тридцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля - 02 марта 2024 г., Москва), Тез. докл. – М., НИУ «МЭИ»: 2024. – С. 1309.

50. Дзюбан, В.С. Методы повышения эффективности средств снижения токов утечки в рудничных электрических сетях напряжением до 1200 В / В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник // Взрывозащищённое электрооборудование. Сб. научн. Трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: Кассиопея, 1999. – С. 94-98.

51. Маренич, М.К. Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю [Электронный ресурс] / М.К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета Вып 2 (28) 2022, Донецк. –С. 46-53. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_54016987_51302773.pdf – Загл. с экрана.

52. Горбатов, П.А. Горные машины для подземной добычи угля: учебн. пособ. / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко, С.В. Павленко, В.В. Косарев; под общ. ред П.А. Горбатова.- 2-е изд. Перераб и доп. – Донецк, Норд Компьютер, 2006. – 669 с.

53. Кабели шахтные. Техническое описание на кабельную продукцию для горнодобывающей отрасли [Электронный ресурс].– Режим доступа: https://kbkab.nt-rt.ru/images/manuals/teh_shah.pdf. – Загл. с экрана.

54. Шахтные кабели. Кабели силовые гибкие теплостойкие экранированные шахтные на напряжение 1,14 кВ КГРЭТШ, КГРЭОТШ. ТУ 16.К180-023-2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kamkabel.ru/landing/>. – Загл. с экрана.

55. Сергин, Е.В. Определение повреждённой фазы на землю в рудничных сетях напряжением 1140 В повышенной протяжённости / Е.В. Сергин, В.П. Кононенко // Взрывозащищённое электрооборудование. Сб. научн. Трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: Кассиопея, 1999. – С. 121-129.

56. Товстик, Ю.В. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт с силовыми полупроводниковыми элементами / Ю.В. Товстик, В.Н. Стоян, В.Н. Савицкий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2012/fkita/petrushin/library/article5.htm>. – Загл. с экрана.

57. Савицкий, В.Н. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях угольных шахт / В.Н. Савицкий, Н.И. Стадник // Горное оборудование и электромеханика. 2006, №9. – С. 31-39

58. АЗУР-4ПП. Аппарат защиты от токов утечки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pneumoplus.com/azur-4pp-apparat-zashchity-ot-tokov-utechki-unificirovannyu-rudnichnyy-azur-4pp.html>. – Загл. с экрана.

59. Статистика отказов и анализ повреждаемости электрических машин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://poznayka.org/s6047t2.html>. – Загл. с экрана.

60. Збарский, Л.А. Исследование среднего ресурса корпусной микалентной изоляции обмоток статоров низковольтных взрывозащищённых электродвигателей в условиях угольных шахт / Л.А. Збарский, И.Г. Ширнин, В.А. Макогон, Е.В. Останькович // Взрывозащищённое электрооборудование (разработка и исследование), сб. научн. тр., 1978, Вып. 15. – С. 36-41.

61. Ванеев, В.Н. Исследование параметров изоляции электродвигателей угольных комбайнов / В.Н. Ванеев, В.М. Гостищев, А.Г. Ручкин //

Взрывозащищённое электрооборудование (разработка и исследование), сб. научн. тр., 1978, Вып. 15. – С. 41-47.

62. Кацман, М.М. Электрические машины: учебник / М.М. Кацман – 16-е изд., стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2017. – 196 с.

63. Брускин, Д.Э. Электрические машины. Ч.1; учебник для вузов /Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1979. – 288 с.

64. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 0. Общие требования Explosionproof electrical apparatus. Part 0. General requirements: ГОСТ 30852.0-2002 (МЭК 60079-0:1998). Межгосударственный стандарт. МКС 29.260.20. Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103394>. – Загл. с экрана.

65. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 1. Взрывозащита вида "взрывонепроницаемая оболочка". Explosionproof electrical equipment. Part 1. "Flameproof enclosure" type explosion protection. ГОСТ 30852.1-2002 (МЭК 60079-1:1998). Межгосударственный стандарт. МКС 29.260.20. Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103235?marker=7D20K3>. – Загл. с экрана.

66. Электрооборудование рудничное. Изоляция, пути утечки и электрические зазоры. Технические требования и методы испытаний. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30852.20-2002 (МЭК 60079-1:1998). Межгосударственный стандарт. МКС 29.260.20. Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293778/4293778662.pdf>.

67. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт: [справочник]: утверждено Главным управлением по эксплуатации, ремонту энергомеханического оборудования и связи Минуглепрома СССР 18.02.88 / М-во угольной пром-сти СССР и др. ; сост.: В.А. Чумаков, М.С. Глухов, Э.Р. Осипов и др. ; под ред.: В.В. Дегтярева, Л.В. Седакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1989. – 613с. : ил.

68. Morley, Lloyd A., Mine power systems. (Information circular: 9258) Includes bibliographies. Includes index. Supt. of Docs. no.: 128.27:9258. 1. Electricity in mining. I. Title. 11. Series: Information circular (United States. Bureau of Mines); 9258. U.S. Government Printing Office: 1991 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/ic9258.pdf>. – Загл. с экрана.

69. Fordham Cooper, W., Dolbey Jones D.A. (1993) Electrical safety engineering (W_Fordham_Cooper_(Auth.)_Electrical_Safety_Engin (b-ok.org).pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://tr.z-lib.gd/book/2280234/2806fb/electrical-safety-engineering.html?dsource=recommend>. – Загл. с экрана.

70. Шипунов, Н.В. Защитное отключение: монография / Н.В. Шипунов, Москва, Энергия, 1968. – 160 с.

71. Сивокобыленко, В.Ф. Режимы работы, релейная защита и автоматика асинхронных электродвигателей: монография / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко. – Донецк: ИП Криничная И.В., 2024. – 422 с.

72. Маренич, М.К. Локализация контура заземления как способ повышения безопасности эксплуатации системы электроснабжения участка шахты / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Радиотехника, электротехника и энергетика. Двадцать восьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (17-19 марта 2022 г., Москва), Тез. докл.- М., НИУ «МЭИ»: 2022. – С. 972.

73. Маренич, М.К. Обеспечение безопасности эксплуатации электрических машин участка шахты при отсутствии заземления/ М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Радиотехника, электротехника и энергетика., Тез. докл. Тридцать первой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, МЭИ, 13-15.03. 2025. – С. 1216.

74. Методы определения места повреждения кабеля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/22726/metody-opredelenija-mesta-povrezhdenija-kabelja/>. – Загл. с экрана.

75. Определение мест повреждений кабельных линий. Петлевой метод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elektro-montagnik.ru/?address=labs/lab13/&page=page43>. – Загл. с экрана.

76. Демченко, О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2011.– 194 с.

77. Гуляева, И.Б. Адаптация петлевого метода определения места повреждения кабеля к условиям применения в структуре рудничного электромеханического комплекса [Электронный ресурс] / И.Б. Гуляева, М.К. Маренич, Л.А. Муфель // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 1 (23) 2021, Донецк. – С. 35-41.– Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47145991_46910989.pdf. – Загл. с экрана.

78. Гуляева, И.Б. Управление коммутацией цепи нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции как способ повышения эффективности защитного отключения сети / И.Б. Гуляева, М.К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 2 (24) 2021, Донецк. – С. 9-16. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47325546_44955422.pdf – Загл. с экрана.

79. Выключатели автоматические А3790. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОБЕ.140.010.ТО. – Режим доступа: http://www.pec.by/content/files_a3790u/a3790_to_ie.pdf. – Загл. с экрана.

80. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2008/fema/tarasenko/library/5.htm> - Загл. с экрана.

81. Реле промежуточные серии РП-21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electro.mashinform.ru/rele-promezhutochnye-ukazatelnye/rele-promezhutochnoe-serii-rp21-obj663.html>. – Загл. с экрана.

82. Маренич, М.К. Автоматический контроль проводимости цепи «фаза - корпус электроустановки» как альтернатива защитному заземлению в электросети

участка шахты / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XXII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в рамках 8-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса»). Донецк, 2022. – С. 138-142 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_65087650_94619119.pdf. – Загл. с экрана.

83. Пускатели взрывозащищённые искробезопасные ПВИТ-630МВ, ПВИТ-515МВ, ПВИТ-400МВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.exdi.ru/file_str/423.pdf. – Загл. с экрана.

84. Маренич, М.К. Комплексный контроль технического состояния электрооборудования как основа альтернативной концепции построения системы электроснабжения участка шахты / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XXIV международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в рамках Международного Научного форума Донецкой Народной Республики), Донецк, 2024. - Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 211-212. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_68495261_32687814.pdf. – Загл. с экрана.

85. Гуляева, И.Б. Адаптация схемы магнитного пускателя к реализации комплексной защиты силового присоединения [Электронный ресурс] / И.Б. Гуляева, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, О.А. Демченко // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 4 (26) 2021, Донецк. – С. 38-47. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_50792212_72661569.pdf – Загл. с экрана.

86. Контакторы вакуумные типа КВТ-1,14. Руководство по эксплуатации КУЮЖ.644536.001. РЭ. – 34 с. – Режим доступа: <https://xn----7sbbf0bfcbnkdld2a0acga8m.xn--p1ai/uploads/files/Rukovodstvo%20KVT-1,14.pdf> . – Загл. с экрана.

87. Блоки БКЗ контроля цепей заземления передвижных машин при питании их напряжением 1140 В: [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/novoe-vzryvozaschischnoe-elektrooborudovanie-18.html>. – Загл. с экрана

88. Каика, В.В. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аниканов и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.

89. Патент на изобретение 2832720 (RU), МПК (2006.01) H02H3/02; H02H7/08 Устройство для выявления повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, И.Б. Гуляева – 2024109616. Заявл. 09. 04 .2024. Опубл. 28. 12. 2024. Бюл. №1. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_80278767_68716103.PDF

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

91. Маренич, М.К. Алгоритм автоматического защитного блокирующего отключения рудничного асинхронного двигателя при отсутствии заземления его корпуса / М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Вестник Донецкого национального университета Серия Г: Технические науки №1/2025. – С. 104-111. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_82351341_26182534.pdf – Загл. с экрана.

92. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

93. Андреев, В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 209 с.

94. Маренич, М.К. Локализация датчиков контакта фазы в структуре асинхронных двигателей как завершающий компонент при построении системы автоматической защиты электротехнического комплекса участка шахты /

М.К. Маренич, И.Б. Гуляева // Вестник Донецкого национального университета Серия Г: Технические науки №3/2025. – С. 86-97 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://donnu.ru/public/journals/files/2025%20Вестник%20Г%203.pdf>

95. Никаноров, С. П. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур / С.П. Никаноров, Н.К. Никитина, А.Г. Теслинов – Москва: РВСН, 1995. – 234 с.

96. Реле электромагнитное 4-х контактное с кронштейном 12В 90.3747-10 / 75.3777-10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sparox.ru/catalog/ehlektrika/rele/400959?instock=0&viewtype=list&sort=1>. – Загл. с экрана.

97. Реле электромагнитное РЭС-32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rudatasheet.ru/relay/res32>. – Загл. с экрана.

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

99. Белошистов, А.И. Новая серия микропроцессорных устройств дистанционного управления БДУ-Д / А.И. Белошистов, А.Л. Серов, А.А. Белошистов // Интеллектуальная Электротехника, 2024, № 3. – С. 50-64.

Приложение А

Копии документов о внедрении результатов исследований:

– в ГБУ «НИИВЭ»;



ГБУ "НИИВЭ"

КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Государственное бюджетное учреждение
"Научно-исследовательский, проектно-конструкторский
и технологический институт взрывозащищенного
и рудничного электрооборудования"
(ГБУ "НИИВЭ")

283052, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, ул. 50-й Гвардейской дивизии, д. 17
E-mail: niive@list.ru; сайт: niive.ru; тел.: +7 (856) 382-93-53, факс: +7 (856) 382-93-52,
ИНН 9303002807/КПП 930301001, ОГРН 1229300018859, ОКПО 83544594

№ *1/511* от *28.08.2025*
На Ваш № 01-29/516 от 25.08.2025 г.

Проректору по научной работе
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет» -
докт. техн. наук, профессору С.В. Борщевскому

Уважаемый Сергей Васильевич!

На Ваш № 01-29/516 от 25.08.2025 г. сообщаем, что результаты диссертационного исследования аспиранта Маренич Марии Константиновны «Совершенствование алгоритмической базы и технического обеспечения управления локальными процессами защитного отключения в системе электроснабжения участка шахты» рассмотрены в нашем институте и признаны актуальными. Подтверждаем целесообразность их использования в НИР, проводимых ГБУ НИИВЭ при проектировании шахтных силовых коммутационных аппаратов и асинхронных двигателей рудничного взрывозащищенного исполнения перспективных серий. В частности, научный и практический интерес представляют:

- разработки, относящиеся к локализации в структуре рудничных асинхронных двигателей и коммутационных аппаратов технических средств выявления контакта фазы электрической сети с их металлическими корпусами, реализующих функцию управления автоматическим защитным отключением;

- техническое решение в области автоматического выявления места повреждения шахтного гибкого экранированного кабеля при использовании его центрального провода в качестве канала информационного сигнала;

- исследования процессов, относящихся к функционированию средств автоматической защиты от утечек тока на землю, обусловленных воздействием ёмкости изоляции шахтенной участковой электрической сети.

Теоретические разработки указанной проблематики приняты нашим институтом к использованию в профильных НИР.

Директор



И.В. Марейченко



ГБУ
"НИИВЭ"

– в ГБУ «МакНИИ»;

КОМИТЕТ
ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«МАКЕЕВСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ
В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
(ГБУ «МАКНИИ»)
ул. Лихачёва, д. 60, г.о. Макеевка, г. Макеевка
Донецкая Народная Республика, 286132
телефон: +7 (8563) 22-22-18,
факс: +7 (8563) 22-19-00
e-mail: maknii2014@inbox.ru
ОГРН 1229300025371, ИНН 9311004371,
КПП 931101001, ОКПО 79297753

Проректору ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
д.т.н, профессору

А.Б. Бирюкову

ул. Артема, 58,
г. Донецк,
г.о. Донецкий,
ДНР, 283001

donntu.info@mail.ru

29.10.2025 № 14/954
на № 01-29/667 от 23.10.2025

Уважаемый Алексей Борисович!

ГБУ «МАКНИИ» рассмотрел представленные Вами материалы диссертационного исследования аспиранта Маренич Марии Константиновны на тему: «Совершенствование алгоритмической базы и технического обеспечения управления локальными процессами защитного отключения в системе электроснабжения участка шахты» и отмечает следующее.

Результаты исследований, выполненных аспирантом Маренич М.К. являются актуальными и содержат ряд значимых научных положений, в том числе в части допустимой области применения средств автоматического ограничения параметров электропоражающего фактора при эксплуатации шахтной участковой сети с учетом различных воздействующих факторов.

Представленные результаты подтверждают практическую значимость выполненных исследований, в частности разработанное автором и запатентованное техническое решение в области автоматического выявления контакта фазу с корпусом электродвигателя и управления его защитным отключением, которое согласуется с обоснованной в диссертации альтернативной концепцией построения системы электроснабжения участка шахты, исключающей применение средств увеличения ёмкости изоляции



Продолжение письма

кабелей.

Следует также отметить, что представленное диссертационное исследование согласуется с направлениями исследований, проводимых в нашем институте, в связи с чем считаем целесообразным использование результатов, полученных аспирантом Маренич М.К. при выполнении научно-исследовательских работ в ГБУ «МАКНИИ».

Директор



В. А. Безбородов

– в ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в учебный процесс;



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г.Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

02.09.2025 № 30-12/65

Диссертационный совет 24.2.491.03
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Маренич Марии Константиновны на тему: «Совершенствование алгоритмической базы и технического обеспечения управления локальными процессами защитного отключения в системе электроснабжения участка шахты», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Маренич М.К., а именно: данные о фактических параметрах процесса ограничения электропоражающего фактора техническими средствами автоматической защиты от утечек тока на землю в условиях воздействия ёмкостной проводимости изоляции шахтной участковой электрической сети и способ выявления контакта фазы с незаземлённым корпусом электроустановки техническим средством, локализуемым в структуре объекта контроля и управляющим его защитным отключением, внедрены в учебный процесс при чтении курса лекций по дисциплине «Автоматическая защита электрооборудования шахт от аварийных и опасных состояний» для студентов направления подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (магистерская программа «Автоматизация технологических процессов и производств в горно-металлургической отрасли»), что отражено в учебной программе и конспекте лекций указанной дисциплины.

Проректор по научно-педагогической работе
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
докт. техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
канд. техн. наук, доцент

В.А. Попов

Декан факультета компьютерных
информационных технологий и автоматике
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
канд. техн. наук, профессор

В.В. Турупалов

– в ФГБОУ ВО «ДонНТУ» при выполнении НИР Н-2022-5.



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

02.09.2025 № 30-12/66

На № _____


Диссертационный совет 24.2.491.03
на базе ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Маренич Марии Константиновны на тему: «Совершенствование алгоритмической базы и технического обеспечения управления локальными процессами защитного отключения в системе электроснабжения участка шахты», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в научно-исследовательскую работу ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Маренич М.К., а именно: анализ специфики воздействия ёмкости изоляции шахтной участковой электрической сети на параметры процессов ограничения электропоражающего фактора, реализуемых функциональными узлами аппаратуры автоматической защиты от утечек тока на землю (включая теоретические и экспериментальные исследования); научное обоснование концепции построения системы электроснабжения участка шахты на основе подавления электропоражающего фактора, обусловленного частичными ёмкостными проводимостями изоляции кабелей, и применения средств управления локальными процессами защитного отключения, - были использованы при выполнении научно-исследовательской работы № Н-2022-5 «Обоснование технических решений в области повышения безопасности эксплуатации шахтных участков электротехнических комплексов» в 2024 г.

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
докт. техн. наук, профессор

 С.В. Борщевский

Начальник управления науки и инноваций
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
докт. техн. наук, доцент

 К.Н. Лабинский

Декан факультета компьютерных
информационных технологий и автоматизации
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
канд. техн. наук, профессор

 В.В. Турупалов

