

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

На правах рукописи

УДК 622.8:65.012.8:331.47(043)

Дубинка Екатерина Сергеевна

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАХТНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРАМИ ОБРАТНЫХ ЭДС ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ

05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Маренич Константин Николаевич

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01
докт.техн.наук



И.А. Бершадский

Донецк – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Шахтный участковый электротехнический комплекс. Типовая структура и функциональные взаимосвязи.....	13
1.2 Анализ опасных состояний, возникающих в процессе эксплуатации электрооборудования участка шахты.....	20
1.3 Обратная ЭДС асинхронного двигателя как фактор воздействия на процесс защитного отключения электросети участка шахты.....	33
1.4 Аналитический обзор исследований и разработок в области выявления и предотвращения опасных состояний электрооборудования участка шахты.....	41
1.5 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования.....	50
РАЗДЕЛ 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЭДС АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВО ВЗАИМОСВЯЗИ С ФУНКЦИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	54
2.1 Свойства контура короткого замыкания в силовой цепи асинхронного двигателя в реализации функции подавления обратной ЭДС.....	55
2.2 Исследование процесса подавления обратной ЭДС двухскоростного двигателя методом закорачивания отключенной обмотки статора.....	62
2.3 Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ интенсивного подавления амплитудно-частотных параметров обратной ЭДС.....	80
2.4 Выводы по разделу 2.....	88
РАЗДЕЛ 3 СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В КОНТЕКСТЕ СООТВЕТСТВИЯ КРИТЕРИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	90

3.1 Методы подавления обратных энергетических потоков как фактор обеспечения защиты от электропоражения в электроустановках участка шахты.....	90
3.2 Анализ влияния энергетики обратной ЭДС АД на точку короткого замыкания в сети силового присоединения.....	100
3.3 Выводы по разделу 3.....	102
РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЭДС ДВУХСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	103
4.1 Процесс подавления обратной ЭДС двухскоростного асинхронного двигателя методом управления параметрами отключенной обмотки статора. Разработка структуры исследовательского стенда и методики эксперимента.....	103
4.2. Анализ результатов экспериментов по п.4.1.....	108
4.3 Процесс подавления обратной ЭДС асинхронного двигателя методом его перевода в режим индукционно-динамического торможения. Разработка структуры исследовательского стенда и методики эксперимента	117
4.4 Анализ результатов экспериментов по п.4.3.....	119
4.5 Выводы по разделу 4.....	122
РАЗДЕЛ 5 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	124
5.1 Совершенствование способа выявления аварийного состояния кабельной сети средствами локального размещения и автономного действия.....	124
5.2 Схемная реализация принципа ограничения энергетических параметров обратной ЭДС двухскоростного асинхронного двигателя методом управления параметрами отключенной обмотки статора.....	129

5.3 Технические предложения по адаптации устройств индукционно-динамического асинхронного двигателя к реализации функции подавления его обратной ЭДС в процессе защитного отключения.....	132
5.4 Выводы по разделу 5.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
Приложение А Копии документов о внедрении результатов исследований.....	151
Приложение Б. Технические характеристики двигателей АДВК.....	153
Приложение В Сведения по моделированию.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Эксплуатация участковых электротехнических комплексов (ЭТК) в условиях шахты сопряжена с повышенными рисками электротравматизма, что обуславливает необходимость ограничения времени существования обратных энергетических потоков асинхронных двигателей на интервале свободного выбега с целью обеспечения безопасных режимов работы. Причины этого состоят не только в сложных условиях подземных горных выработок, в которых эксплуатируется силовое рудничное электрооборудование, но и в необходимости широкого применения механически незащищённых гибких кабелей для передачи энергии от распределительных пунктов к асинхронным двигателям (АД) потребителей, функционирующих нестационарно. Задачи обеспечения безопасности эксплуатации ЭТК решаются в направлениях: создания быстродействующих средств выявления касания человека к элементам электрической сети, находящейся под напряжением и обесточивания цепи прикосновения; применения многократно дублирующих друг друга устройств защиты от к.з. защит от токовых перегрузок, перегрева и др. Фактором, объединяющим эти технические решения, является защитное отключение - отделение энергетического потока трансформаторной подстанции (ТП) участка от всех компонентов участкового ЭТК. Тем не менее, опыт эксплуатации силового электрооборудования участков шахт свидетельствует о наличии электротравматизма, что подтверждается официальными статистическими данными и имеет тенденцию роста в электротехнических комплексах с оборудованием высокой мощности. Повышение мощности технологических установок участка шахты обуславливает широкое применение электрических сетей напряжения 1140 В, повсеместное применение АД высокой мощности в составе электроприводов. В этом случае функция автоматического защитного отключения электрической сети участка шахты оказывается недостаточной, поскольку после него электрическая сеть продолжает оставаться под

напряжением, создаваемым обратными ЭДС АД (в режиме выбега), продолжительности которых в условиях применения АД высокой мощности оказываются достаточными для создания прецедентов электропоражения в отключенной сети.

Степень разработанности темы исследований. Комплексное обоснование процессов автоматического защитного отключения электрооборудования участков угольных шахт дано в исследованиях В.П. Колосюка. В них обобщены исследования и разработки в области обеспечения электробезопасности ЭТК (работы Р.М. Лейбова, В.Д. Кочеткова, В.С. Дзюбана), защиты от к.з. (работы Я.С. Римана), рассмотрены вопросы безопасности эксплуатации электрооборудования ЭТК в условиях применения импульсных полупроводниковых регуляторов. Принципиально важным результатом исследований явились разработки нормативных документов в области электробезопасности, в частности, ГОСТ 22929-78 «Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия», где регламентируются параметры факторов электропоражения: допустимый ток через тело человека 25 мА, количество электричества – 50 мА·с; сопротивление тела человека – 1 кОм. Исследования в области ускорения защитного отключения электросети выполнены Н.Ф. Шишкиным. Им же была предложена концепция сопровождения защитного отключения коротким замыканием выхода коммутационного аппарата. Разработки Л.А. Муфеля, О.А. Демченко в области ограничения токов к.з., посвящены вопросам повышения ресурса и безопасности эксплуатации шахтных кабелей. Разработки аппаратов защиты на современной элементной базе с улучшенными параметрами чувствительности и быстродействия освещены в работах Е.А. Вареника, В.Н. Савицкого. Однако все они касаются вопросов выявления опасного состояния ЭТК участка шахты и его защитного отключения, и не рассматривают проблематику, обусловленную действием обратных ЭДС АД высокой мощности на элементы электрооборудования после защитного отключения электрической сети. В исследованиях К.Н. Маренича, И.В. Ковалёвой, С.В. Васильца,

анализируется обратная ЭДС АД в режиме выбега как фактор опасности электротравматизма, обоснована концепция выявления опасного состояния кабеля электропитания АД автономно действующим устройством. Проблематике защиты обслуживающего персонала от ЭДС выбега электродвигателей посвящены работы А.В. Пичуева, В.И. Петурова, И.Ф. Суворова, Д.А., где анализируется влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. Однако данные исследования представляют собой только начальный этап решения комплекса научно-технических задач в области автоматического ускоренного защитного обесточивания ЭТК участков шахты, в частности, обоснования способов и структуры устройств подавления обратных ЭДС АД в режиме выбега.

Цель и задачи исследования. Цель работы - обеспечение безопасных режимов работы шахтных участковых электрических сетей на основе ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей в процессе отключения путём управления параметрами их обратных ЭДС.

Задачи исследований:

- анализ исследований и разработок в области обеспечения безопасных условий эксплуатации шахтных участковых ЭТК, включая особенности проявления опасных состояний, особенности устройства и функционирования защит; анализ факторов опасности, обусловленных обратными ЭДС АД потребителей;

- исследование свойств управления электромагнитными параметрами АД, включая двухскоростные АД и эффект индукционно-динамического торможения АД, в контексте установления возможности подавления их обратных ЭДС на интервале выбега и обеспечения на основе этого состояния ЭТК участка шахты, соответствующего критериям безопасности эксплуатации;

- разработка исследовательских стендов и экспериментальные исследования процессов подавления обратных ЭДС АД обоснованными способами управления их электромагнитными параметрами;

- разработка схем устройств выявления аварийных и опасных состояний шахтного участкового ЭТК и устройств подавления обратных ЭДС АД потребителей в процессе и после защитного отключения электропитания.

Объект исследования. Объектом исследования являются процессы, происходящие в электрической сети участка шахты при касании человеком проводника фазы, обусловленные электроэнергетической функцией асинхронных двигателей.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы управления энергетическими параметрами обратных ЭДС в структуре электротехнического комплекса участка шахты в контексте ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей на уровне, соответствующем критерию безопасности по фактору электропоражения.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: общей теории электрических цепей, теории переходных процессов, теории электрических машин, теории эксперимента, включая проведение натуральных экспериментов; методов: пространственного вектора, математического моделирования, применения цифровых измерительных устройств.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- разработана математическая модель управления параметрами электрогенерирующей функции асинхронного двигателя, отличающаяся представлением электрической машины трансформаторными связями, коммутируемыми с фиксированной частотой и скважностью, что составило основу экспресс-метода расчёта параметров воздействия обратной ЭДС в структуре электротехнического комплекса на цепь касания человеком контура «фаза – земля», включая процессы, обусловленные управлением

электромагнитными параметрами асинхронного двигателя в контексте ограничения электропоражающего фактора величинами, нормируемыми в ГОСТ 22929-78.

- разработана математическая модель электрогенерирующей функции двухскоростного асинхронного двигателя, отличающаяся способом представления взаимного влияния ротора, рабочей и отключенной от сети обмоток статора при создании в последней контура короткого замыкания и позволяющая произвести точный расчёт параметров воздействия обратной ЭДС асинхронного двигателя в структуре электротехнического комплекса на цепь касания человеком контура «фаза – земля».

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в совершенствовании методов математического моделирования процессов в ЭТК участка шахты, в частности, методов моделирования процесса воздействия на величину обратной ЭДС управлением электромагнитными параметрами АД, включая специфику электромагнитной системы двухскоростного двигателя, а также применение способа представления АД многообмоточным трансформатором с управляемой коммутацией его электрических и магнитных компонентов в контексте подавления электропоражающего фактора, обусловленного воздействием обратной ЭДС АД при касании человеком контура «фаза – земля».

Практическое значение результатов исследований.

- в обосновании способов управления электромагнитными параметрами асинхронного, в т.ч., двухскоростного двигателя, создающими эффект ускоренного уменьшения величины и частоты обратной ЭДС в режиме выбега, что соответствует задаче повышения безопасности технического состояния шахтного участкового ЭТК после защитного отключения напряжения электропитания;

- в обосновании возможности применения индукционно-динамического торможения АД как средства предотвращения опасности электротравматизма в ЭТК участка шахты после защитного отключения напряжения питания;

- в усовершенствовании способа контроля состояния изоляции электрической сети участка шахты, техническим средством, действующим вне привязки к месту подключения, позволяющим выявить момент возникновения утечки тока на землю, включая синхронную утечку двух и трёх фаз, без информационной связи с устройством защиты, действующим со стороны ТП и позволяющим сформировать функцию управления ограничением параметров обратной ЭДС АД в процессе защитного отключения напряжения питания сети.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности изменения величины электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети при защитном отключении цепи утечки тока на землю в зависимости от способа управления электромагнитными параметрами асинхронного двигателя в процессе подавления его обратной ЭДС.

2. Новая парадигма представления проблемы и способа её решения в области обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов, состоящая в дополнении действия защиты от утечек тока на землю функцией независимого контроля проводимости контура «фаза – земля» со стороны присоединений асинхронных двигателей потребителей и ограничения их обратных ЭДС управлением электромагнитными параметрами при возникновении утечки тока на землю.

3. Способ устранения электропоражающего фактора в электрической сети участка шахты, состоящий в создании контура токов индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя потребителя в диапазоне углов отпираания тиристоров цепи динамического торможения 100 - 135 электрических градусов, что достаточно для ограничения продолжительности обратной ЭДС двигателя на уровне 0,2 – 0,3 с и не сопровождается его динамическими перегрузками.

4. Научное обоснование способа выявления утечки тока на землю, состоящего в формировании цепи импульса оперативного тока путём присоединения к фазам сети через точку нулевого потенциала источника напряжения постоянного тока, подключенного выходом к заземляющему проводнику через диодно-ёмкостную цепь с целью формирования информационного импульса напряжения в момент появления утечки тока на землю, включая синхронную утечку тока трёх фаз, что создаёт возможность контроля состояния изоляции электротехнического комплекса участка шахты техническим средством со стороны подключения статора асинхронного двигателя потребителя, не связанным функционально с устройством защиты, действующим со стороны участковой трансформаторной подстанции.

Научные и практические результаты диссертационного исследования в виде научных обоснований и разработки технических решений приняты ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ») к использованию в профильных научно-исследовательских работах.

Личный вклад соискателя. Все разделы и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и её реализации, в разработке испытательных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением методов математического и компьютерного моделирования, представительным объёмом экспериментальных данных, полученных на натурных моделях элементов электротехнического комплекса участка шахты, а также удовлетворительной сходимостью аналитических и экспериментальных результатов. По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности

05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки), в частности: п. 7 «Научное обоснование, конструирование, установление области рационального применения и оптимизация параметров способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов». Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и одобрены на XV, XVI, XVII, XVIII и XIX Международных научно-технических конференциях аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДОННТУ, 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г.), XVIII и XIX Международных молодёжных научных конференциях «Севергеоэкотех» (Ухта, УГТУ, 2017 г., 2018 г.), VI и IX Международных научно-практических конференциях «Наука, техника, инновации» (Усинск, филиал УГТУ, 2016 г., 2019 г.), заседании круглого стола по теме «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах» (ГУ «МакНИИ», 2019 г.) в рамках V Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»; Международном научно-практическом форуме «Россия в XXI веке: глобальные вызовы, риски и решения» (Москва, РАН, 2019 г.); XVII Всероссийской конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, ЮФУ, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 17 печатных работах, из них, 6 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 11 – в материалах конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 106 рисунков, 10 таблиц, список использованной литературы из 98 наименований и 3 приложений.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Шахтный участковый электротехнический комплекс. Типовая структура и функциональные взаимосвязи

Электротехнические комплексы (ЭТК) технологических участков шахты относятся к объектам, обеспечивающим выполнение различных технологических и, прежде всего, процессов угледобычи. Типовая структура ЭТК технологического участка шахты строится на основе применения источника питания – комплектной передвижной трансформаторной подстанции (ТП), распределительного пункта участка (РП) и асинхронных двигателей (АД), которые получают электропитание от ТП посредством разветвленной сети гибких кабелей (ГК). В качестве силовых коммутационных аппаратов, как правило, применяются магнитные пускатели (П), которые в совокупности с групповым автоматическим выключателем (АВ) на входе образуют схему участкового распределительного пункта (РП) (Рисунок 1.1) [1, 2, 3]. Наряду с применением магнитных пускателей, совокупность силовых коммутационных аппаратов РП участка может быть размещена в комплектном распределительном устройстве – станции управления.

ЭТК добычного участка шахты отличается наличием многочисленных потребителей, которые не стационарны, относятся к потребителям малой, средней и большой мощности и укомплектованы АД с короткозамкнутым ротором. В ряде случаев применяются устройства для плавного пуска АД, а также частотно-управляемые электроприводы горных машин. Существенной проблемой в области эксплуатации шахтных участковых ЭТК является необходимость применения гибких силовых кабелей для подключения перемещаемых электромеханических установок к пускателям. Наличие источников внешних механических воздействий и отсутствие защиты от механических повреждений – есть прецедент технического противоречия,

определяющий причину возникновения аварийных и опасных состояний в шахтных участковых электросетях. К таким состояниям могут быть отнесены междуфазные короткие замыкания (к.з.), сопровождаются воспламенением, представляют угрозу пожара, взрыва метано-воздушной смеси, а также повреждения изоляции отдельных силовых жил кабеля, что создаёт опасность электропоражения человека.

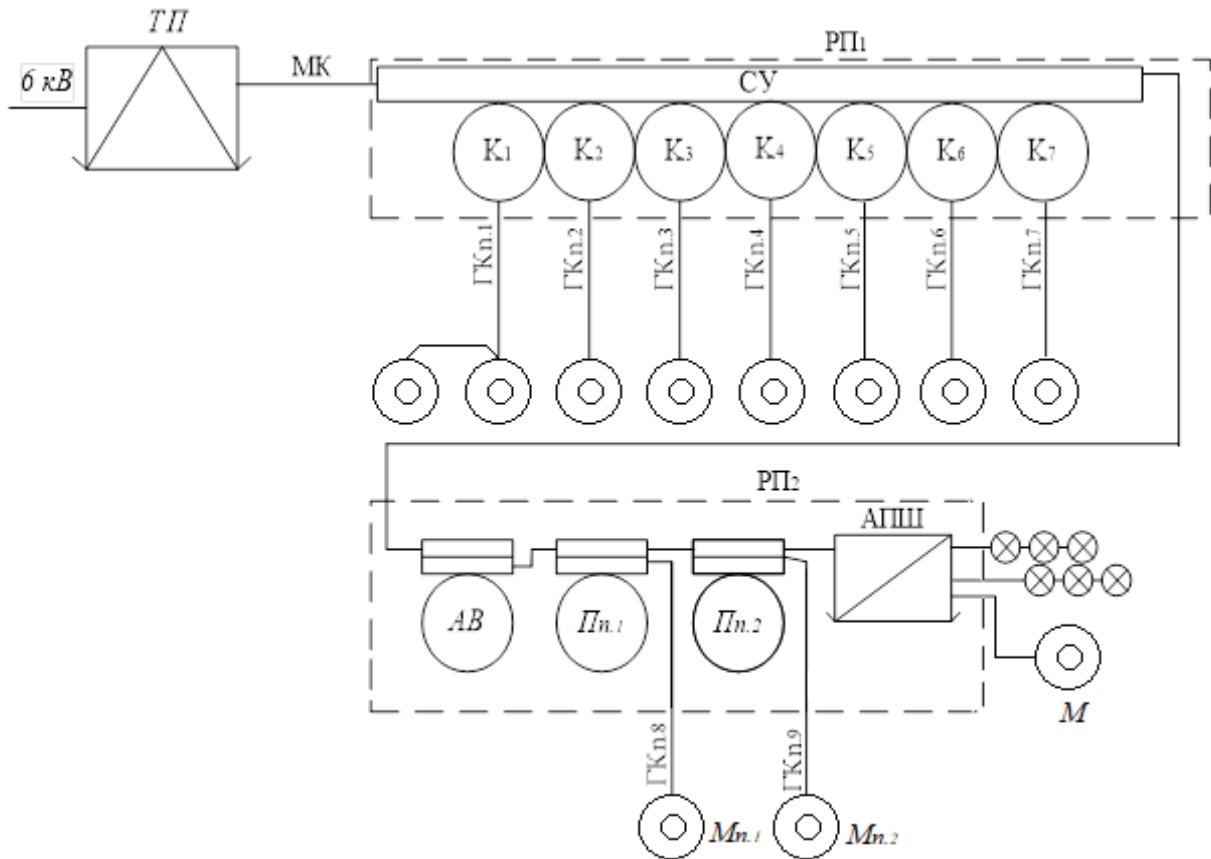


Рисунок 1.1 – Типовая схема электроснабжения добычного участка шахт на основе применения станций управления (а); пускателей (б) [4]

В обосновании структуры и функциональности систем электроснабжения участков шахт, применяемого силового электрооборудования и средств автоматизации весомый вклад внесли М.И. Озерной [5]; Р.М. Лейбов [6, 7, 8]; Г.Г. Пивняк [9, 10, 11]; В.С. Дзюбан [12, 13, 14]; В.П. Колосюк [15, 16]; Я.С. Риман [17, 18]; В.Д. Кочетков [19, 20, 21]; Н.Ф. Шишкин [22] и др. В частности, профессором В.П. Колосюком была предложена концепция автоматического

защитного отключения рудничного электрооборудования основанная на разработках Р.М. Лейбова, Я.С. Римана, В.С. Дзюбана, Д.В. Кочеткова и развитая исследованиями Е.А. Вареника, В.Н. Савицкого и др. [23, 24].

Н.Ф. Шишкиным и В.Ф. Антоновым дано научное обоснование возможности технической реализации опережающего по времени момент возможного взрыва метановоздушной смеси при повреждении кабеля защитного отключения шахтной участковой электрической сети, что актуально при эксплуатации пластов крутого падения с повышенным выделением метана.

Рассматривая функцию автоматического защитного отключения, т.е., отделения от сети участка энергетического потока, формируемого ТП, представляется целесообразным проанализировать специфику устройства технологических защит и их функциональность в условиях возникновения соответствующих аварийных и опасных состояний.

Функциональность источника электроснабжения технологического участка шахты комплектной трансформаторной подстанции (Рисунок 1.2) определяется назначением и устройством её основных компонентов. Помимо преобразования линейного напряжения 6кВ высоковольтной сети в напряжение низшего номинального уровня (660 В; 1140 В) ТП выполняет ряд распределительных и защитных функций. Эти функции реализуются автоматическим выключателем (Рисунок 1.3) в составе распределительного устройства низкого напряжения (РУНН) ТП, функционирующим под воздействием внешних защит и, непосредственно, предусмотренных в нём электромагнитных расцепителей [25, 26]. Отключению подлежат такие аварийные и опасные состояния, как междуфазные короткие замыкания в отходящих силовых присоединениях (защита отрабатывается расцепителями максимального тока (Рисунок 1.4,в) автоматического выключателя, а также нулевым и независимым расцепителями АВ (Рисунок 1.4а, Рисунок 1.4б), выполняющих в данном случае функцию исполнительных элементов дополнительной максимальной токовой защиты, реагирующей на превышение вторичным током датчиков величины токов уставки [27].

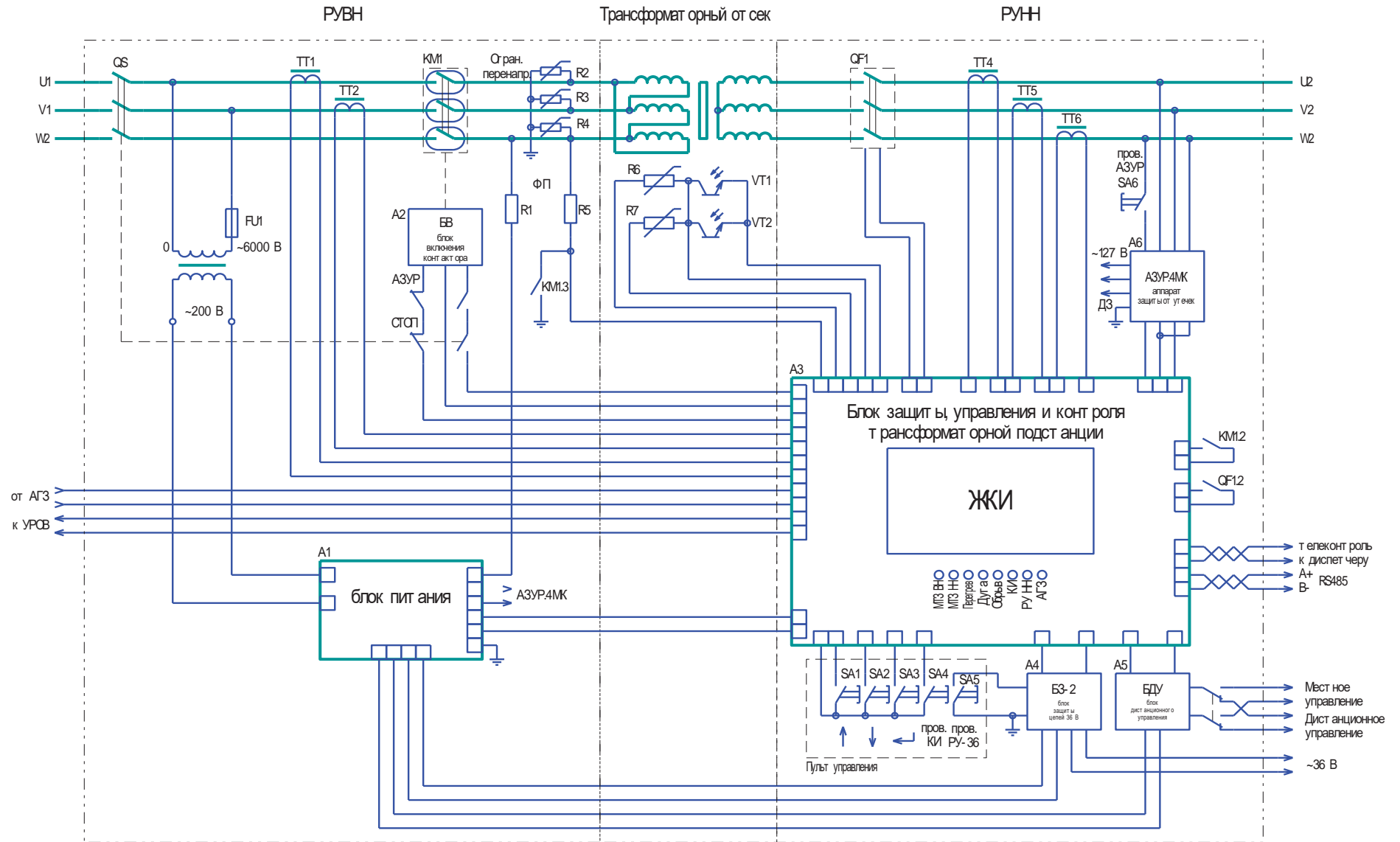


Рисунок 1.2 – Блочно-принципиальная электрическая схема подстанции ТПШ: РУВН, РУНН - распределительные устройства высокого и низкого напряжения; QS - разъединитель; $QF1$ – автоматический выключатель [28]

Кроме того отключению автоматическим выключателем ТП подлежат утечки тока на землю как результат снижения активного сопротивления между фазой и контуром «земля» в отходящем присоединении вследствие ухудшения технического состояния изоляции либо касания человеком элемента электрооборудования, нормально находящегося под напряжением (отрабатывается нулевым и независимым расцепителями как исполнительными элементами [29] защиты от утечек тока на землю); исчезновение напряжения в силовом присоединении на выходе ТП (отрабатывается нулевым расцепителем АВ).

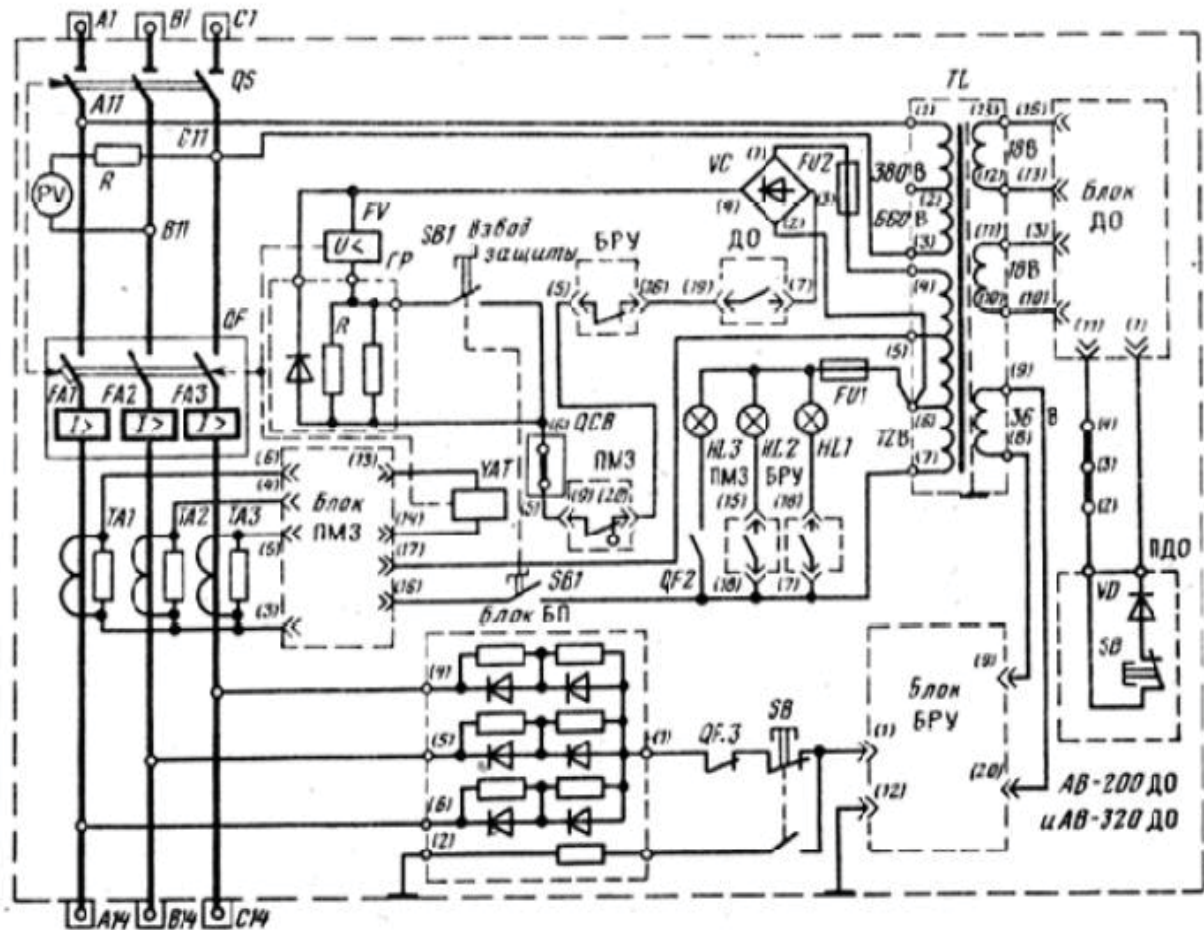


Рисунок 1.3 – Схема автоматического выключателя серии АВ распределительного пункта технологического участка шахты [14]

Функциональные возможности защиты от коротких замыканий, реализуемой комплексом «максимальный расцепитель – кинематическая схема АВ (аппарат серии А37ХХ) представлены на рисунке 1.5 и свидетельствуют о

функциональной зависимости собственного времени срабатывания исполнительного элемента защиты от величины тока сети [30, 31].

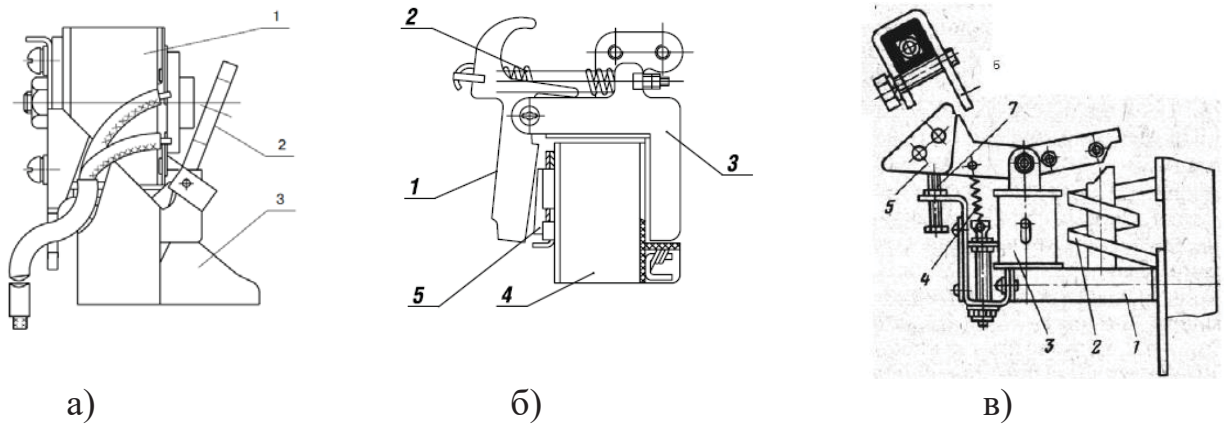


Рисунок 1.4 – Конструкции расцепителей: а – независимый: 1 - электромагнит; 2 - якорь; 3 – скоба; б – нулевого напряжения: 1 - якорь; 2 - пружина; 3 - ярмо; 4 - катушка; 5 – сердечник; в – максимальный: 1 - сердечник; 2 - обмотка; 3 - катушка; 4 - пружина; 5 – якорь

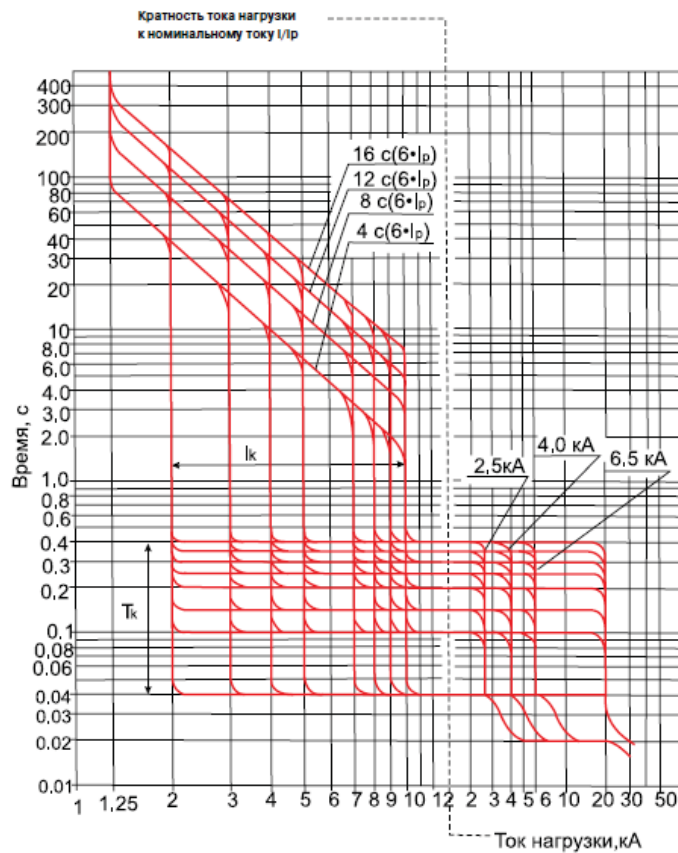


Рисунок 1.5 – Время-токовая характеристика выключателей переменного тока А3793Б и А3793С, А3794Б и А3794С [30]

Помимо этого, нулевой и независимый расцепители позволяют отключать (разъединять) силовую трехфазную контактную группу АВ по командам внешних защит (автоматическая газовая защита, защита трансформатора ТП от перегрева и т.п.).

Групповой автоматический выключатель распределителя участка, предусмотренный непосредственно перед магистралью вводов магнитных пускателей (Рисунок 1.1) и не отличается структурно и функционально от АВ распределительного устройства низкого напряжения ТП. Он выполняет дополнительную (дублирующую) коммутационно-защитную функцию, однако, в отличие от последнего, не имеет функциональной связи с аппаратом защиты от утечек тока на землю.

Дистанционная коммутация силовых присоединений осуществляется контакторами магнитных пускателей или станции управления. Основным функциональным узлом контакторов является их электромагнитная система, что определяет свойство оставаться во включенном состоянии, пока ток в обмотке электромагнита не снизится до величины, меньшей тока удержания. Таким образом, наличие напряжения в сети (обратных ЭДС АД в режиме выбега) после отключения ТП является условием некоторого продолжения по времени включенного состояния контакторов силовых рудничных коммутационных аппаратов.

Активными функциональными узлами шахтного участкового электротехнического комплекса здесь выступают: асинхронные двигатели потребителей, силовые коммутационные аппараты и радиальная кабельная сеть, представленная гибкими экранированными кабелями (Рисунок 1.1).

Помимо функций передачи электроэнергии по силовым жилам такой кабель является элементом структуры защитного комплекса электрооборудования, обеспечивая: заземление нестационарных потребителей через заземляющую жилу, функционирование защиты от утечек тока на землю при повреждении изоляции силовой жилы, благодаря наличию проводящих резиновых экранов, располагаемых в контакте с заземляющей жилой (Рисунок 1.6) [32].

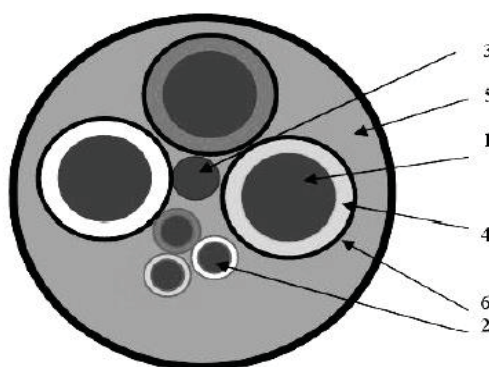


Рисунок 1.6 – Устройство экранированного гибкого кабеля марки КГЭШ: 1 – силовая жила; 2 – сигнальная жила; 3 – заземляющая жила; 4 – резиновая изоляция; 5 – оболочка кабеля; 6 - резиновый полупроводниковый экран

Эти специфика устройства и свойства гибких кабелей должны учитываться при анализе процессов в ЭТК после защитного отключения напряжения питания.

1.2 Анализ опасных состояний, возникающих в процессе эксплуатации электрооборудования участка шахты

К числу аварийных и потенциально опасных состояний системы электроснабжения участка шахты могут быть отнесены состояния повышенной проводимости между фазой и контуром «земля», а также междуфазные короткие замыкания (к.з.). В первом случае создаётся опасность электропоражения человека при касании к элементам сети, нормально находящимся под напряжением (опасность проявляется как следствие повреждения изоляции, либо как следствие общего снижения сопротивления изоляции кабельной сети участка шахты, в частности, в результате подключения значительного числа кабелей к выводам одного источника электропитания).

Во втором случае фактор опасности обусловлен вероятностью воспламенения кабеля и других электротехнических устройств в цепи тока к.з. Энергетические параметры процесса обусловлены величиной тока к.з. и его продолжительностью. В данном случае следует учитывать, что в электрической

сети участка шахты токи трехфазного ($I_{кз}^{(3)}$) и двухфазного ($I_{кз}^{(2)}$) к.з. отличаются значительными величинами, т.к. ограниваются крайне малыми активными (r) и индуктивными (x) сопротивлениями трансформатора ТП и кабелей до точки к.з. [18]:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{тр} + R_{к})^2 + (X_{тр} + X_{к})^2}} \quad (1.1)$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{U_{л}}{2 \cdot \sqrt{(R_{тр} + R_{к})^2 + (X_{тр} + X_{к})^2}} \quad (1.2)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение сети; $R_{тр}$; $X_{тр}$ – соответственно, активное и индуктивное сопротивления трансформатора питания (подстанции); $R_{к}$; $X_{к}$ – соответственно, активное и индуктивное сопротивления кабеля от трансформатора до точки короткого замыкания.

С повышением мощностей ТП и сечений кабелей параметры $R_{тр}$; $X_{тр}$; $R_{к}$; $X_{к}$; – уменьшаются, что обуславливает тенденцию к увеличению тока к.з и, как следствие, к снижению ресурса элементов электрооборудования.

Состояние междуфазного к.з. в шахтной участковой электросети определяется: количеством фаз сети, задействованных в этом процессе; параметрами источника питания и кабельной сети аварийного присоединения; наличием или отсутствием нагрузки электрического присоединения, её параметрами и состоянием (вращающийся или неподвижный ротор). Это состояние иллюстрируется соответствующими схемами замещения и векторными диаграммами (Рисунок 1.7) и сопровождается переходным процессом изменения тока в цепи короткого замыкания, поступающего со стороны трансформаторной подстанции (Рисунок 1.8) [18]:

$$i_{к} = i_{n} + i_{a} = \sqrt{2}I_{n} \cdot \sin(\omega t - \varphi + \alpha_{к}) + i_{a0} \cdot e^{-t/T_a} \quad ; \quad (1.3)$$

где I_{n} – действующее значение периодической составляющей тока к. з.; i_{a0} – апериодическая составляющая тока к. з. в начальный момент возникновения; ω

$= 2\pi f$ – круговая частота; φ – угол фазового смещения тока в цепи к. з.; α_k – фаза возникновения к.з.; f – частота сети; X_k , r_k – соответственно, индуктивное и активное сопротивление цепи к. з.; T_a – постоянная времени цепи к.з. $T_a = \frac{X_k}{\omega \cdot r_k}$

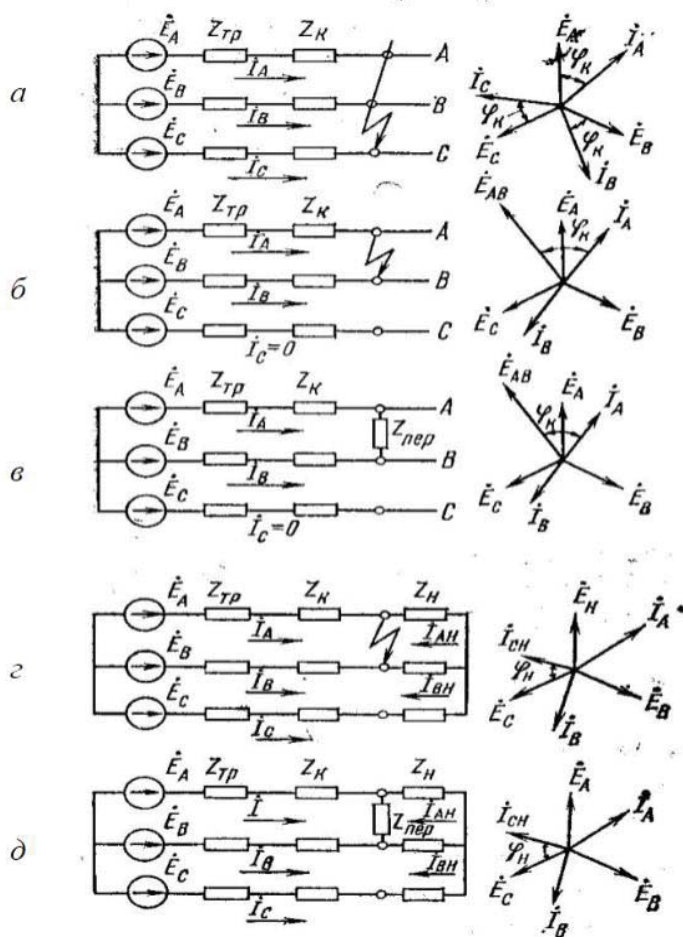


Рисунок 1.7 – Схемы замещения и векторные диаграммы токов при различных видах междуфазных к.з. в участковых сетях: трехфазное к.з. (а) двухфазное неметаллическое к.з. в сети с отключенной нагрузкой (б); двухфазное к.з. через переходное сопротивление в сети с отключенной нагрузкой (в); двухфазное металлическое к.з. в сети с присоединенной нагрузкой (г); двухфазное к.з. через переходное сопротивление в сети с присоединенной нагрузкой (д); $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – ЭДС фаз трансформатора; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – токи фаз при к.з. в участковой сети; $Z_{mp} = R_{mp} + jX_{mp}$ – полное сопротивление фазы трансформатора; $Z_k = R_k + jX_k$ – полное сопротивление фазы кабельной сети; $Z_{nep} = R_{nep} + jX_{nep}$ – переходное сопротивление в месте короткого замыкания; $Z_n = R_n + jX_n$ – полное сопротивление нагрузки

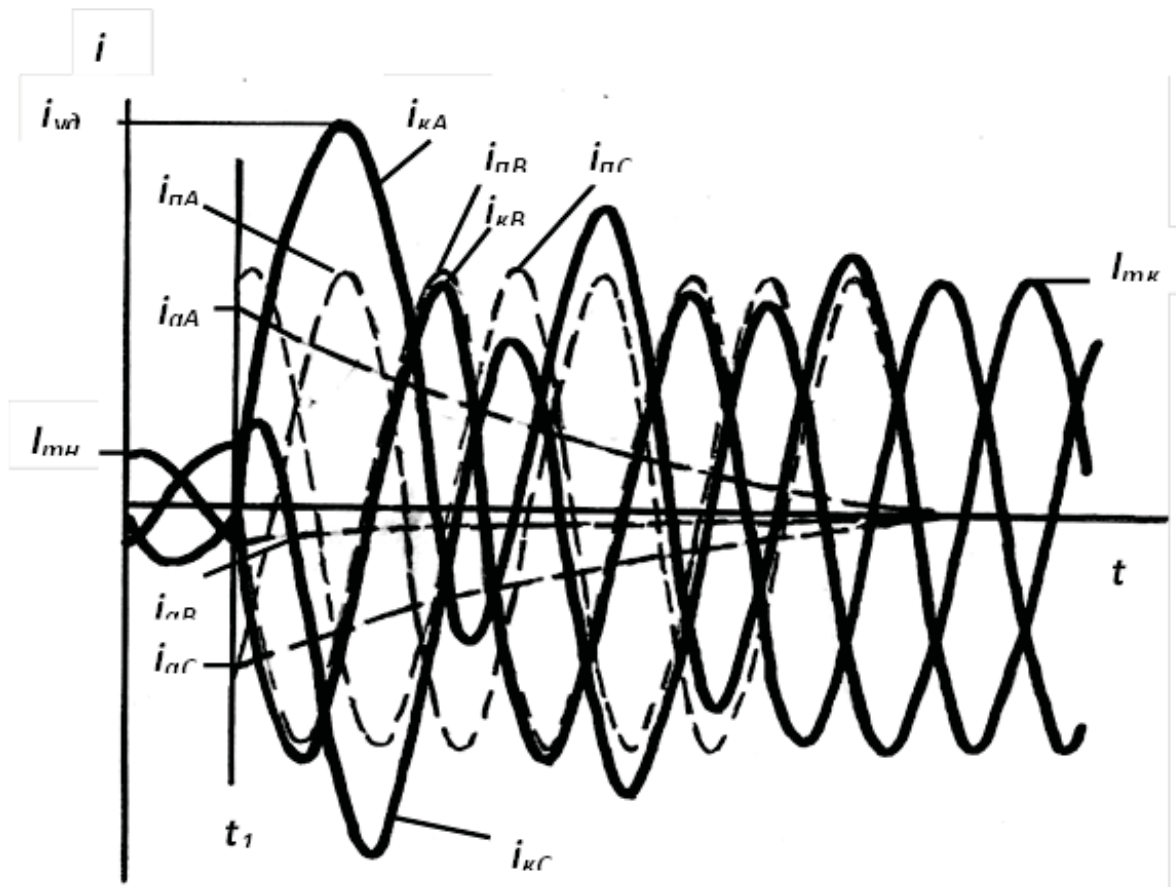


Рисунок 1.8 – Диаграмма фазных токов переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании: индексами A ; B ; C отмечены составляющие токов к. з. соответствующих фаз сети, I_{mn} ; I_{mk} - соответственно, амплитуды номинального тока сети (до возникновения короткого замыкания) и установившегося тока к.з.

Повсеместное применение электротехнических источников высокой мощности и систем электроснабжения технологических участков предопределяет их основную роль в создании производственных опасностей, таких, как взрывы метано-воздушной смеси, пожары в шахтах, опасности электропоражения персонала. Так, в соответствии с [16, 33], за период с 1976 года по 2008 год 47,58% всех взрывов произошли от электрических источников [16]. При этом около 37,28% взрывов произошли от повреждений кабелей, в результате которых возникли к.з. или утечки тока на землю. Из них 25,8% взрывов произошли при эксплуатации гибких силовых кабелей [34], что привело к гибели 178 человек (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Причины и места искрения или дугообразования, вызвавшие взрывы метановоздушной среды

№ п/ п	Причины искрения или дугообразования	Количество случаев	
		ед.	в % ко всем взрывам от электротока
1	2	3	4
1	Рабочее искрение на контактах пусковой аппаратуры при открытых крышках или нарушении взрывозащиты	10	16,95
2	Искрение в коробках вводов электрооборудования при нарушенной взрывозащите или открытых вводах	13	22,03
3	Искрение или дуга при повреждении кабелей	19	32,2
4	Искрение или дуга при выдергивании гибких кабелей из вводных устройств	3	5,08
5	Искрение в местах «холодных» счалок	2	3,4
6	Искрение на контактах контроллеров электровозов при нарушенной взрывозащите	6	10,17
7	Искрение в схемах аккумуляторных батарей электровозов	2	3,4
8	Искрение или к.з. в кабельных цепях электрооборудования напряжением 36 В	4	6,8
9	Искрение при разъединении кабельного штепсельного взрывозащищенного разъема при включенном контакторе в пускателе	1	1,7
	Всего	59	100

Несмотря на повсеместное применение средств защиты от утечек тока на землю в шахтных участковых электросетях, фиксируются летальные случаи электропоражения. Так, в соответствии с [34] за период с 2000 г по 2008 г. гибкие силовые кабели стали причиной 11,76% смертельных поражений обслуживающего персонала электротоком (Таблица 1.2). Это свидетельствует о недостаточности защитной функции применяемых специальных технических средств.

Таблица 1.2 – Распределение поражений обслуживающего персонала электрическим током по виду электрических объектов в период с 2000 по 2008 г.

№ п/п	Наименование объектов, явившихся источником поражения обслуживающего персонала электрическим током	Количество ПЭТ	
		в абсолютных величинах	в процентах
1	2	3	4
1	Пусковая аппаратура переменного тока	5	29,42
2	Гибкие силовые кабели	2	11,76
3	Бронированные кабели	3	17,64
4	Вулканизированные соединения и счалки гибких силовых кабелей	1	5,88
5	Концевые и соединительные муфты бронированных кабелей	4	23,54
6	Контактная сеть электровозов	2	11,76
	Всего	17	100

Междуфазные короткие замыкания в шахтных электросетях являются одной из основных причин экзогенных пожаров в шахте. Так, по данным приведенным в [34] на электрические источники приходится 35,3% всех пожаров в шахтах, в том числе 8,5% приходятся на замыкания в гибких силовых кабелях. Основные причины возгорания кабелей приведены в таблице 1.3, из которой следует, что в 40,43% случаев возгорание происходит из-за к.з. в гибких кабелях, в 4,04% - из-за перегрузки гибких силовых кабелей вследствие заниженного сечения.

Таблица 1.3 – Причины возгорания гибких силовых экранированных шахтных кабелей

Причины	Кол-во случаев, %
к.з. в кабелях	73,73
а) в гибких кабелях	40,43
б) в бронированных кабелях	33,33
к.з. в местах присоединения кабелей к электрооборудованию	13,14
Перегруз гибких кабелей из-за заниженного сечения	4,04

Продолжение таблицы 1.3

Перегрев кабелей из-за некачественного контакта в местах соединения	3,03
Загорание от трения конвейерной ленты и скребковой цепи	2,02
Замыкание на контактный провод тяговой цепи	4,04
Всего загораний	100,00

Характер и интенсивность повреждений гибких силовых кабелей, определяются условиями эксплуатации, уровнем механизации очистных работ, квалификацией обслуживающего персонала и темпом ведения работ по добыче угля. Воздействие на кабель средств механизации добычного участка приводит к разрушению защитной шланговой оболочки и изоляции с одновременным замыканием жилы на землю или жил между собой. Повреждение изоляции проволоками основных жил при их изломе приводит к образованию токов утечки, токов короткого замыкания, вследствие чего происходит искрообразование.

Положение усугубляется недостаточной надежностью и эффективностью (быстродействием обесточивания сети) применяемых защит, факты отказов которых зафиксированы документально [15, 35, 36, 37].

Результаты наблюдений за состоянием серийных и опытных образцов гибких силовых кабелей в высоконагруженных лавах предприятий ОАО „Шахта „Красноармейская-Западная № 1”, Шахтоуправление им. В.М. Барканова, АП „Шахта имени А.Ф.Засядько” приведены в таблице 1.4. В ОАО УК „Шахта „Красноармейская-Западная № 1” осуществлялось наблюдение за опытными образцами кабелей типов КГЭШВ, КГЭШС-ПБ, КГЭШуС-ПБ, которые эксплуатировались совместно с кабелеукладчиком. На шахте им. В.П. Барканова наблюдение велось за серийным кабелем КГЭШ, на шахте им. А.Ф. Засядько проводилось наблюдение за серийными кабелями типов КГЭШ и КГЭ-БУШВ. Общее время простоев участков по причине повреждения кабелей составило 126 ч 20 мин. Из них для кабелей с изоляцией и оболочкой из ПВХ пластиката - 32 ч 35 мин. Среднее время простоя каждой лавы по причине отказов в кабеле составило 6 часов 20 мин в месяц.

Из таблицы 1.4 следует, что наиболее частыми повреждениями являются: обрыв жил дистанционного управления, раздир оболочки, прокол кабеля стальной проволокой до медных жил, прокол изоляции проволокой жилы.

Известно, что взрыв, пожар или поражение электротоком возникают по одной логической схеме и имеют общие математические модели [38]. В частности, взрыв как случайное событие, является результатом совмещения двух других независимых случайных событий - появление открытого искрения в кабеле и загазирование выработки. Для их предотвращения применяется комплекс технических средств и организационно-технических мероприятий, направленных на исключение возникновения этих событий. С момента разработки и освоения промышленностью гибких экранированных кабелей [39] повышение безопасности их эксплуатации в системе электроснабжения добычного участка в основном проходило в направлении совершенствования устройств защитного отключения и коммутационных аппаратов [31] (Таблица 1.5).

На основании работ, выполненных ИГД им. А.А. Скочинского и МакНИИ, в 1949 году „Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах” [40] впервые было регламентировано общее время отключения поврежденной сети напряжением до 700 В, которое не должно превышать 200 мс и складывалось из времени срабатывания устройства защитного отключения и времени срабатывания, отключающего сеть коммутационного аппарата.

Как следует из таблицы 1.5 средства защитного отключения (аппарата защиты от утечек тока на землю, максимальная токовая защита, а также коммутационные аппараты), удовлетворяют этому требованию.

В соответствии с п.5, гл.1, разд.VIII «ПБ» [41], в шахтных участковых электрических сетях напряжения 1140 В [42], общее время срабатывания коммутационных аппаратов (автоматических выключателей и магнитных пускателей) и устройств защитного отключения в системах электроснабжения на напряжение 1140 В, составляет 120 мс.

Таблица 1.4 – Характер и частота повреждений гибких силовых кабелей, эксплуатируемых в лавах с высокой нагрузкой

Тип кабеля	Длительность наблюдения, сут	Суточная нагрузка, т	Виды повреждений	Количество повреждений	Суммарное время простоя
1	2	3	4	5	6
КГЭШВ 3х50+1х10+3х2,5 (с кабелеукладчиком)	89	2500	Обрыв жил дистанционного управления. Раздир оболочки. Прокол кабеля до медных жил. Прокол изоляции проволокой жилы.	1 3 2 2	1 ч 3 ч 4 ч 20 мин 1 ч 30 мин
КГЭШС-ПБ 6х25+3х3,5+4х2,5 (с кабелеукладчиком)	95	3500	Раздир оболочки. Прокол кабеля до медных жил. Прокол изоляции проволокой жилы.	4 1 1	2 ч 40 мин 1 ч 15 мин 1 ч 45 мин
КГЭШУС-ПБ 6х25+3х3,5+4х2,5 (с кабелеукладчиком)	87	3500	Раздир оболочки. Прокол кабеля до медных жил. Прокол изоляции проволокой жилы.	1 2 1	1 ч 20 мин 3 ч 2 ч
КГЭШ 3х50+1х10+3х2,5 (без кабелеукладчика)	65	1500	Обрыв жил дистанционного управления. Раздир оболочки. Прокол кабеля до медных жил. Прокол изоляции проволокой жилы. Обрыв основной жилы. Раздавливание породой.	7 8 1 4 2 2	8 ч 6 ч 30 мин 2 ч 6 ч 3 ч 3 ч 30 мин
КГЭБУШВ 6х50+1х10+3х4	77	2500	Обрыв жил дистанционного управления, i	6 2	6 ч 6 ч

Для шахт, разрабатывающих крутые пласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа, повышение концентрации метана в шахтной атмосфере до взрывчатых пределов может происходить быстро и скорость повреждения кабелей может быть мгновенной [16]. Подтверждением этому является авария, которая произошла на шахте им. Карла Маркса ГП „Орджоникидзе уголь” в 2008 г [43]. Это определяет целесообразность и актуальность исследований в области повышения быстродействия защитной функции.

Таблица 1.5 – Собственное и полное время срабатывания электрических защит

Тип электрической защиты	Собственное время срабатывания, мс	Коммутационный аппарат для отключения электроэнергии	Максимальное время срабатывания, мс (АВ, КТУ)	Общее время снятия напряжения с кабеля, мс
УМЗ	≤ 50 мс (при $k'=1,5$) ≤ 20 мс (при $k=5$)	ПВИ	КТУ ≤ 90	$\leq 110-140$
ПМЗ (ТЗП)	$\leq 5,0$ мс (при $k=1,5$) $\leq 0,8$ мс (при $k=5$)	РУНН ТП, АФВ, АВ	АВ ≤ 30	$\leq (30,8-35)$
АЗУР	≤ 100 мс, (при $U=0,6U_{ном}$) ≤ 70 мс (при $R_{вр}-I$ кОм)	РУНН ТП	АВ ≤ 30	$\leq 100-130$
РУВ-380В	≤ 100 мс	РУНН ТП	АВ ≤ 30	$\leq 100-130$

k^* - коэффициент чувствительности.

Исследованиями ИГД А.А. Скочинского [44, 45, 46] и МакНИИ [47, 48, 49, 50, 51, 52] при изучении процесса разрушения гибкого кабеля различными телами, движущимися с различными скоростями и энергией, установлено, что при повреждении кабелей опасность возникновения открытого искрения зависит от времени развития аварии. Из таблицы 1.6 следует, что наименьшее время развития аварии возникает при повреждении кабеля при взрывных работах

проводами электродетонаторов, что приводит к утечке тока в месте повреждения.

При повреждении кабеля стальным клином время развития аварии для экранированного кабеля (ГРШОП и аналогичных) зависит от характера и скорости повреждения.

Таблица 1.6 – Время развития аварии при различных видах повреждений

Вид повреждения	Время развития
Разрушение кабеля резцом комбайна	5,0-6,0
Разрушение кабеля кусками падающей породы	10,0
Повреждение кабеля при взрывных работах (провоолокой)	3,5
Разрушение кабеля стальным клином	$t=h*/v$
Разрушение кабеля стальным клином в натянутом состоянии	5,0
Разрыв кабеля статической нагрузкой	>10,0

В частности, исследованиями В.И. Шумейко [47] установлено, что при отсечении кабеля безопасное время отключения источника питания находится в пределах 1,65-0,85 мс и имеет вероятностный характер, что показано в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Зависимость вероятности возникновения взрыва метановоздушной смеси от времени отключения кабеля при быстром его повреждении

Время снятия напряжения с кабеля, мс	Вероятность взрыва метановоздушной смеси
До 7-8	1,0
До 6	0,5
2	0,1
1,6	0,001
0,8-1	0,0001

Таким образом, при отсечении кабеля вероятность воспламенения взрывоопасной смеси превышает допустимую вероятность взрыва, принятую для испытаний на взрывобезопасность рудничного электрооборудования [16, 44, 49, 51]. Поэтому для шахт, разрабатывающих крутые пласты, рекомендован комплекс защитных мер, состоящих из систем газового и электрического

быстродействующего опережающего отключения. К ним относится концепция быстродействующего опережающего отключения, в соответствии с которой предусматривается снятие напряжения с поврежденного гибкого кабеля за время, не более 2,5 мс, и энергетическая изоляция поврежденного кабеля от источника питания и электродвигателя (Рисунок 1.9) [53].

Испытания системы опережающего быстродействующего отключения, состоящего из выключателя АБВ-250 на напряжение 380В/660В, короткозамыкателей для отключения напряжения и гашения ЭДС выбега электродвигателей за время не более 2,5 мс, гибкого кабеля ГВШОП 6х25+1х10+5х2,5 на шахтах Центрального района Донбасса показали положительные результаты. Система обеспечивала выполнение требований п.2, гл.2, разд. VIII „ПБ” в части применения в очистных забоях и подготовительных выработках пластов крутого падения, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа, электрооборудования с уровнем взрывозащиты РВ.

Однако устойчивой работоспособности системы не было достигнуто ввиду того, что:

- в случае обрыва силовых и сигнальных проводников при механическом повреждении (обрыве) либо междуфазном к.з. в кабеле исключалась возможность прохождения команды на срабатывание короткозамыкателей в цепи статоров АД потребителей от устройства максимальной токовой защиты автоматического выключателя АБВ-250;

- время срабатывания очень короткое;

- габариты полупроводникового (моторного) короткозамыкателя требуют исполнительного места для его размещения, что представляет определенные трудности, особенно на пластах малой мощности;

- больших токах металлического к.з. (свыше 4-5 кА), которое возникает при включении короткозамыкателя, невозможно было обеспечивать защиту и надежность работы полупроводниковых элементов, используемых в короткозамыкателе.

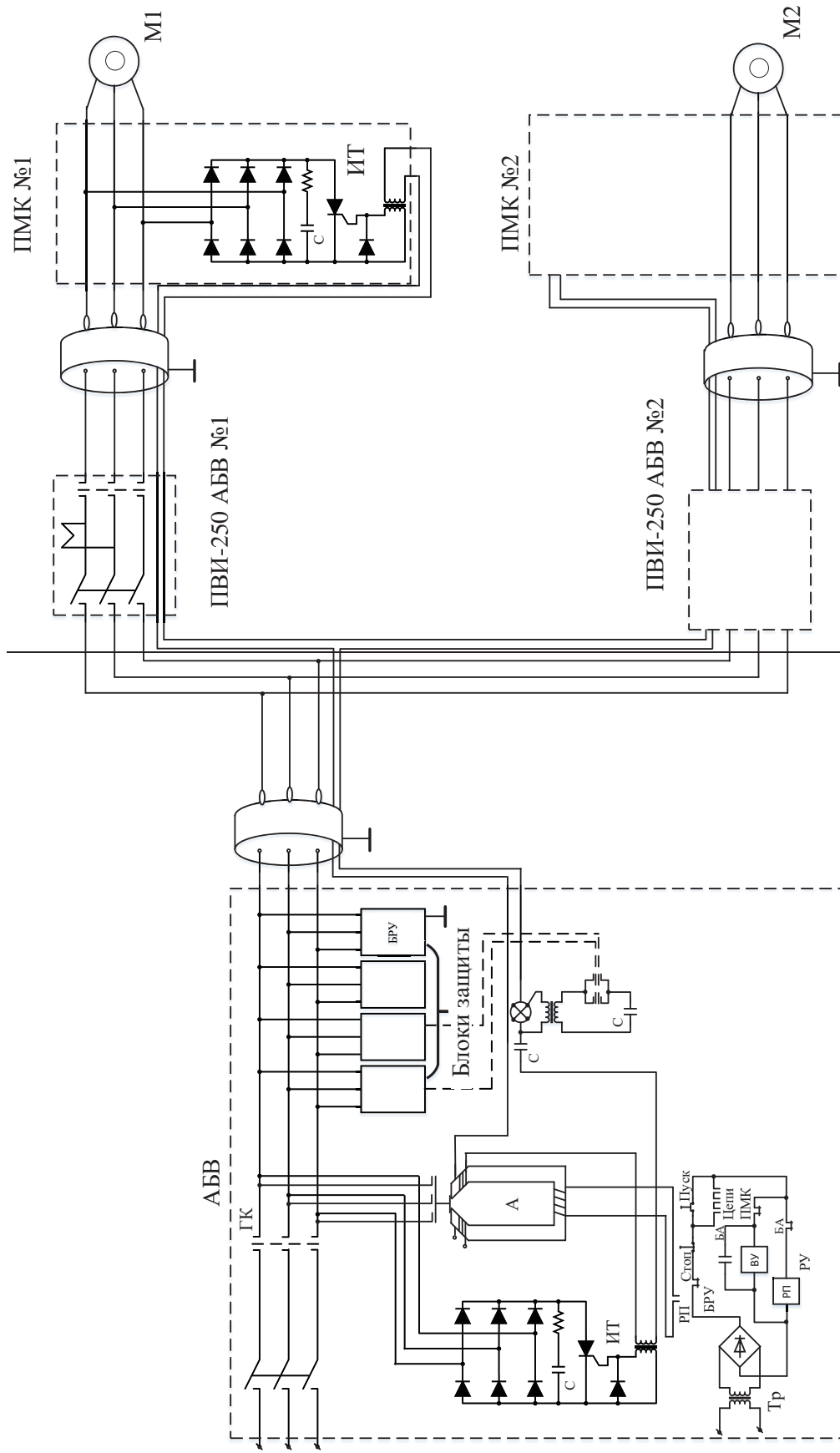


Рисунок 1.9 – Структурная схема системы электроснабжения шахтного участка с быстродействующим защитным отключением на основе применения короткозамыкателей на входе системы электроснабжения участка шахты и на вводах статоров АД потребителей

1.3 Обратная ЭДС асинхронного двигателя как фактор воздействия на процесс защитного отключения электросети участка шахты

Характерной особенностью функционирования асинхронного двигателя является формирование на его статоре в режиме выбега ЭДС вращения, индуктируемой вращающимся полем ротора. Её начальные частота и амплитуда соразмерны соответствующим параметрам напряжения сети и имеют тенденцию к снижению по экспоненте, постоянная времени T_p которой определяется отношением обобщенных параметров индуктивности и активного сопротивления АД [54]:

$$u_{\text{вр}} = \frac{L_m}{L_p} j(1-s)\omega_0 \psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-s)t}, \quad (1.4)$$

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_n}{I_0 r_p \omega_0} \quad (1.5)$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и ω_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора, 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.

При этом, имеет место влияние приведенного момента инерции $J_{\text{пр}}$ привода и статического момента сопротивления M_c на интенсивность замедления ротора АД:

$$t_T = J_{\text{пр}} \int_{\omega_2}^0 \frac{d\omega}{-M_c} = \frac{J_{\text{пр}} \omega_2}{M_c}, \quad (1.6)$$

где ω_2 – частота вращения ротора двигателя при $M = M_c$, t_T – продолжительность снижения скорости вращения ротора АД

Таким образом, увеличение мощности АД предопределяет соответствующее повышение параметра индуктивности L и, как следствие – увеличение продолжительности существования обратной ЭДС в сети после отключения генерирующего её асинхронного двигателя.

Объектом воздействия обратной ЭДС АД в структуре технологического участка шахты является кабельная сеть, а также силовые цепи автоматических выключателей, магнитных пускателей (в т. ч., электромагнитные системы контакторов) в условиях сохранения гальванической связи с АД. Специфика процесса заключается в том, что в электротехническом комплексе в режиме выбега асинхронный двигатель (M) проявляет себя как генератор трёхфазной ЭДС (Рисунок 1.10).

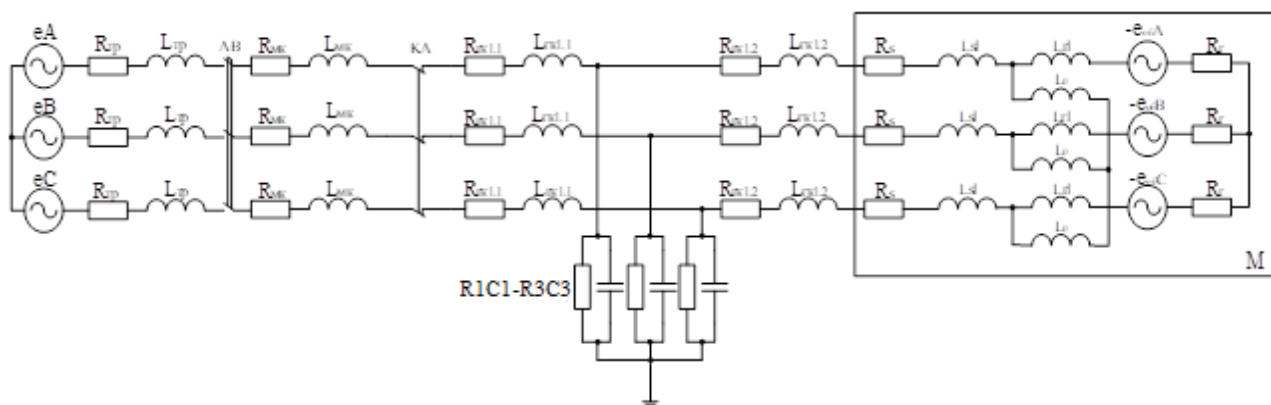


Рисунок 1.10 – Схема замещения силового присоединения сети с асинхронным двигателем: АВ – автоматический выключатель; КА – контактор; M – асинхронный двигатель; e_A , e_B , e_C – мгновенные значения фазных напряжений на выходе трансформаторной подстанции; R_{mp} , R_{mk} , R_{sk} , L_{mp} , L_{mk} , L_{sk} – активные сопротивления и индуктивности трансформатора, магистрального и гибкого кабелей; R_s , R_r , L_{s1} , L_{r1} – активные сопротивления и индуктивности соответственно статора и ротора АД

При этом, в многомашинных ЭТК, содержащих двигатели различных мощностей функцией электрогенератора обладают наиболее мощные, сохраняющие наибольшие по величине амплитуды обратных ЭДС. Специфика

схем контакторов пускателей состоит в наличии значительного диапазона токов их удержания и отключения. Это определяет эффект стохастического отключения кабельных присоединений с АД в сети ЭТК по мере снижения обобщенной обратной ЭДС и соответствующий стохастический процесс перехода двигателей, сохраняющих функцию электропотребителя (на интервале после отключения напряжения сети), в состояние электрогенераторов по мере отдаления от общих элементов сети отключаемыми контакторами пускателей асинхронных двигателей с большей мощностью. Последние в этом случае сохраняют свою электрогенерирующую функцию применительно к кабелю между статором и пускателем двигателя.

Данный вывод иллюстрируется анализом процессов в ЭТК (Рисунок 1.11), происходящих после отключения напряжения со стороны ТП с учётом параметров электромеханического оборудования, приведенных в таблице 1.8.

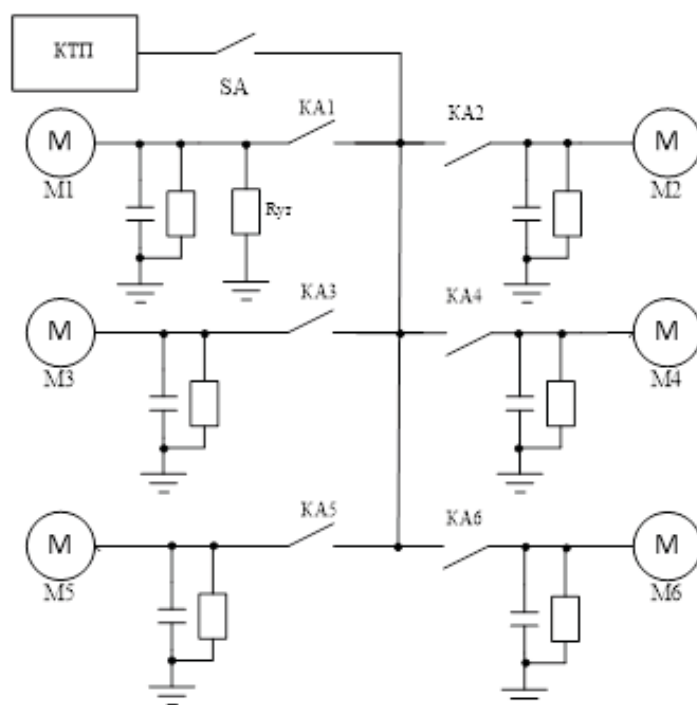


Рисунок 1.11 – Расчетная схема ЭТК участка шахты

Применительно к схеме (Рисунок 1.11) введем допущение что однофазная утечка тока на землю ($R=1\text{кОм}$) возникла в кабеле потребителя (АД) М1.

Таблица 1.8 – Принятые компоненты структуры ЭТК участка шахты и их параметры

Тип двигателя	Номинальные параметры АД			Параметры гибких кабелей		
	мощность, кВт	ток, А	$\cos \varphi$	сечение жилы, мм ²	длина, м	удельная емкость изоляции, мкФ/фазу/км
2ЭДКОФ250LB4	110	122	0,85	70	200	0,87
2ЭКВ3,5–90	90	111	0,81	25	200	0,424
АИУМ255М4	55	62,5	0,87	70	200	0,87
ЭКВЭ4-220	200	236	0,83	70	200	0,87
2ЭКВ3,5-90	90	111	0,81	25	55	0,424
ЭДКОФ 43/4	55	70	0,79	25	55	0,424

Формы синусоид обратных ЭДС АД, затухающих по амплитуде и частоте, вычисленные в соответствии с зависимостями (1.4 – 1.6) в случае отсутствия гальванической связи между статорами разных двигателей представлены на рисунке 1.12.

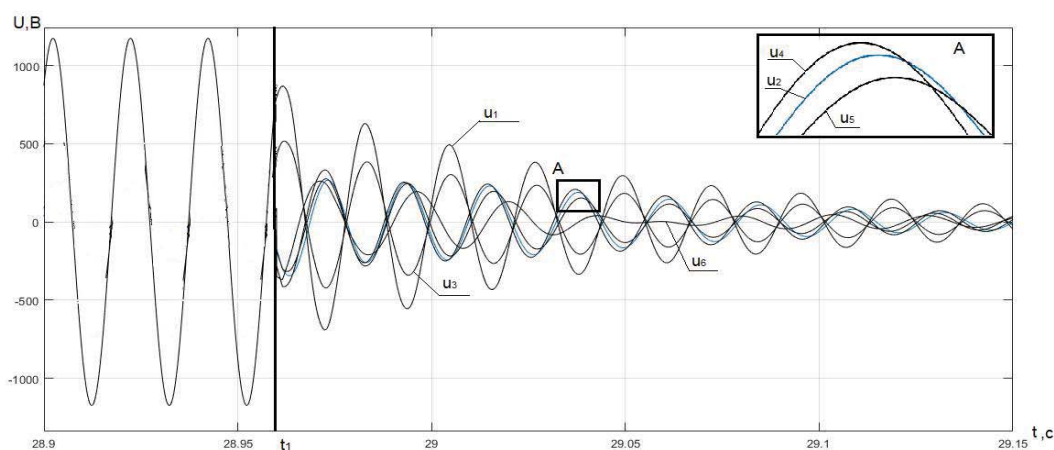


Рисунок 1.12 – Диаграммы моделирования ЭДС вращения двигателей (для одной фазы) разомкнутой сети

Коммутационный процесс в электросети участка шахты сопровождающий отключение энергетического потока ТП характеризуется первоначальным

отключением АВ подстанции и последующим отключением контакторов пускателей. При этом контакторы могут находиться некоторое время во включенном состоянии под действием обратных ЭДС двигателей потребителей. В предположении, что отключение контакторов пускателей происходит одновременно и с учетом различных мощностей и, следовательно, постоянных времени снижения обратных ЭДС двигателей расчетная диаграмма напряжения в элементах электросети имеет вид, представленный на рисунке 1.13. Кроме того, с момента отключения контакторов из-за прекращения взаимного влияния двигателей увеличивается интенсивность торможения роторов АД (Рисунок 1.14). [55].

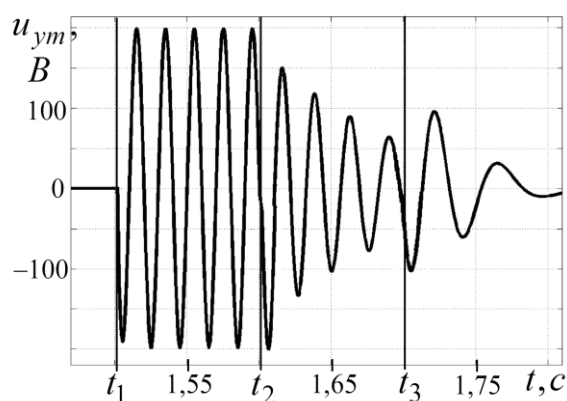


Рисунок 1.13 – Диаграмма изменения напряжения на сопротивлении R_{ym} цепи однофазной утечки тока на землю

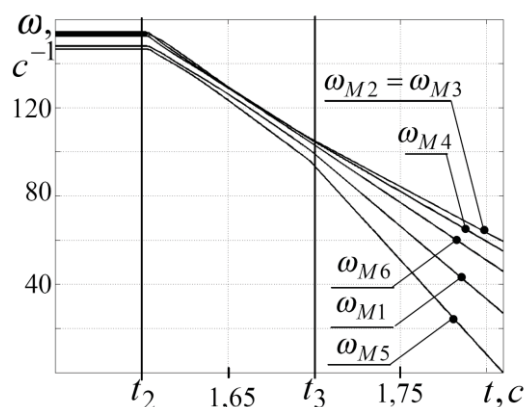


Рисунок 1.14 – Диаграмма изменения частот вращения двигателей M1-M6 во время выбега

Показательным представляется пример исследования обратной ЭДС асинхронного двигателя мощностью 250 кВт как воздействующего фактора на кабельную сеть.

Рассмотрим варианты аварийных (опасных) состояний:

- утечка тока на землю;
- трёхфазное к.з. в кабеле питания АД для сети номинального линейного напряжения 660 В применительно к кабелям марки КГЭШ длиной до 300 м с сечениями рабочих жил: $3 \times 35 \text{ мм}^2$; $3 \times 50 \text{ мм}^2$; $3 \times 70 \text{ мм}^2$.

Применительно к параметрам принятых функциональных элементов с учетом положений теории моделирования ЭДС выбега АД [56], полученные мгновенные значения тока утечки на землю и диаграммы токов короткого замыкания представлены на рисунках 1.15-1.16.

На диаграммах обозначены: t_1 – момент возникновения утечки (проводимости сопротивлением 1кОм) между фазой и контуром «земля»; t_2 – момент отключения сети автоматическим выключателем ТП.

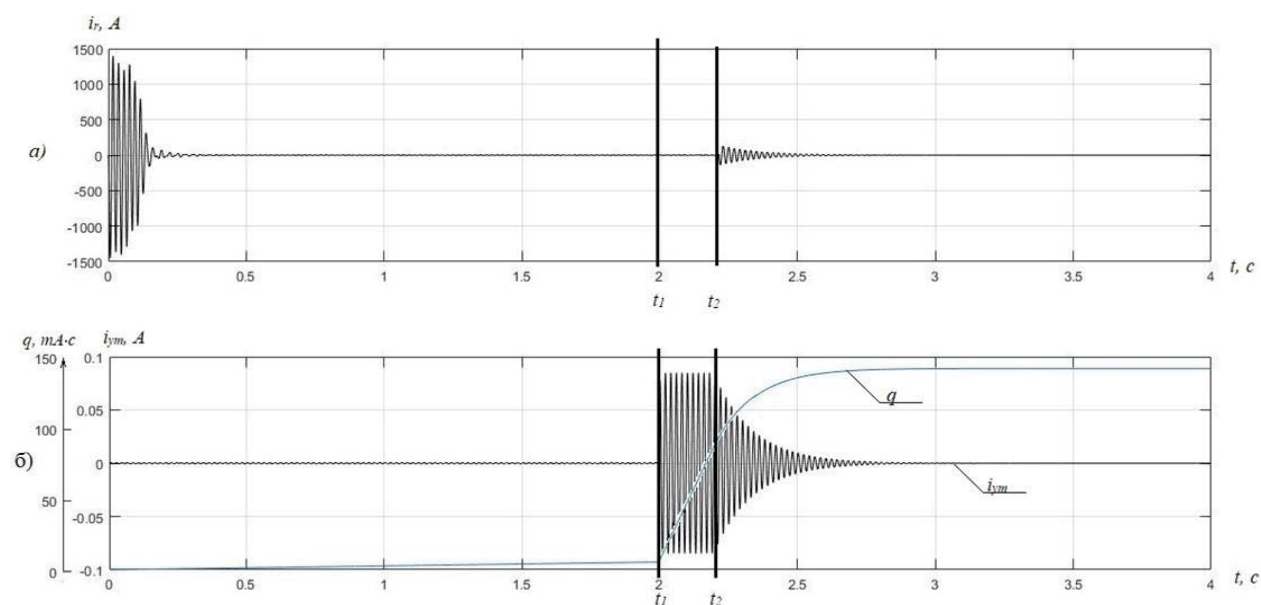


Рисунок 1.15 – Диаграммы величин тока ротора АД типа 1ЭКВ3,5-200 (а), тока утечки на землю и накопления количества электричества (б) через сопротивление цепи утечки тока на землю; устройство компенсации емкостной составляющей тока на землю отсутствует

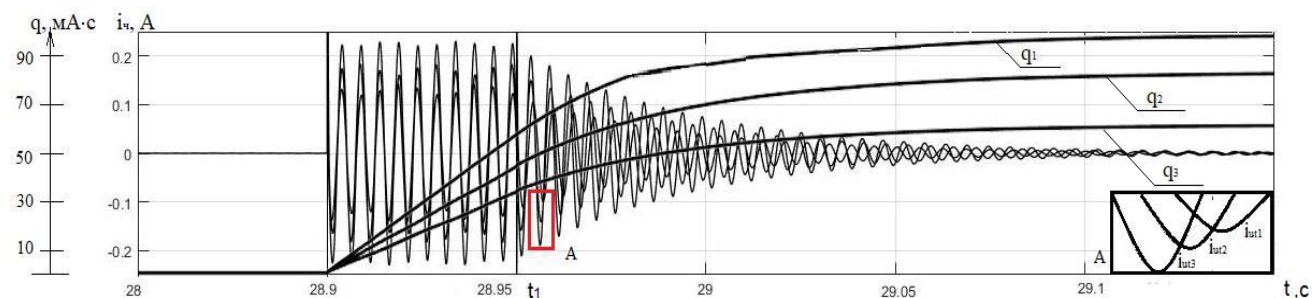


Рисунок 1.16 – Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю i_{ut} и количества электричества q через сопротивление аварийной точки в сети напряжением 660 В для кабелей типа 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3- КГЭШ 3x35 мм²

Представленные результаты исследования подтверждают предположение о возможности обратных ЭДС АД потребителей участка шахты создавать величины количества электричества q в цепи утечки тока на землю после защитного отключения сети. Превышающие предельно допустимые параметры $q=50mA \cdot c$ [57].

Таким образом, сохранение опасного состояния шахтного участкового электротехнического комплекса после защитного отключения напряжения сети подтвердило функциональную недостаточность отделения от сети энергетического потока, генерируемого ТП, и актуальность исследований и разработок в области подавления, отделения от сети обратных энергетических потоков АД потребителей.

С учётом выявленных недостатков при попытке промышленного применения систем автоматического защитного опережающего отключения шахтной участковой электрической сети, проанализированных в п.1.2 (Рисунок 1.9) принципиально важным является то, что отделение обратного энергетического потока АД должно происходить по команде автономно действующего средства выявления опасного состояния силового присоединения, установленного со стороны ввода АД одновременно со срабатыванием защитного устройства со стороны трансформаторной подстанции [54]. При этом защитная функция должна распространяться не только на состояние к.з., но и на возникновение утечки тока на землю.

Принципиально важным является то, что отделение обратного энергетического потока АД должно происходить по команде автономно действующего средства выявления опасного состояния силового присоединения со стороны ввода АД одновременно со срабатыванием защитного устройства со стороны трансформаторной подстанции.

Технические решения, реализующие данную функцию, их параметры и структура обоснованы в исследованиях [58] (Рисунок 1.17). применительно к схеме устройства реализуется процесс кратковременного образования цепи повышенной проводимости между фазами и контуром «земля» как условие

создания управляющего сигнала на защитное отделение обратного энергетического потока асинхронного двигателя в момент возникновения аварийного состояния сети (утечка тока на землю, замыкание фазы на землю как следствие междуфазного короткого замыкания в гибком экранированном кабеле марки КГЭШ). В этом случае создается путь тока через резисторы $R1-R4$, диод $VD1$ и цепь «фаза – $R_{ут}$ – контур «земля»». Применение конденсаторов $C1-C2$ и диода $VD1$ создаёт прецедент кратковременности процесса, ограниченности времени параллельного присоединения резисторов $R1-R3$ к сопротивлению тела человека $R_{ут}$, поддержания режима изолированной нейтрали электросети.

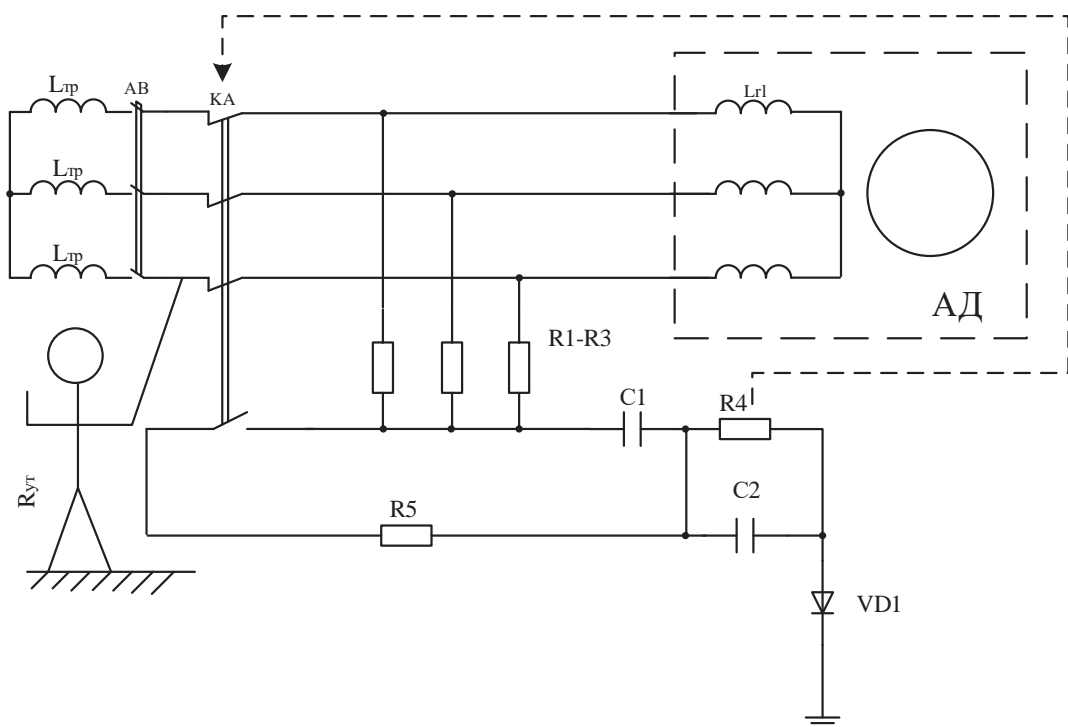


Рисунок 1.17 - Схема автономного способа выявления повреждения цепи электропитания асинхронного двигателя

Таким образом, устройство позволяет реагировать на начало аварийного процесса (опасного состояния) шахтной участковой электросети. Формирование управляющего сигнала на резисторе $R4$ создаёт возможность автоматического отделения от кабельной сети обратных ЭДС АД, что в сочетании с автоматическим защитным отключением сети со стороны ТП создаёт эффект автоматического всестороннего защитного обесточивания шахтного участкового электротехнического комплекса [58].

Нерешённой остаётся задача технической реализации процедуры защитного отключения от сети (подавления) обратного энергетического потока асинхронного двигателя компактным устройством, адаптированным к применению на силовом вводе АД, кроме того становится невозможным формирование тока в цепи $R-C-VD$ информационного сигнала в случае мгновенного возникновения трёхфазной проводимости кабеля на контур «земля» в связи с наличием одинаковых нулевых потенциалов в цепи «звезда» указанных проводимостей и в цепи «звезда» контура $R-C-VD$ устройства защиты. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований с целью обоснования структуры параметров универсального автономно действующего устройства выявления аварийного состояния в силовом присоединении статора асинхронного двигателя, включая мгновенное возникновение проводимости трёх фаз кабеля на контур «земля».

1.4 Аналитический обзор исследований и разработок в области выявления и предотвращения опасных состояний электрооборудования участка шахты

При эксплуатации электрической сети шахтного участкового электротехнического комплекса существует вероятность электропоражения персонала несмотря на то, что режим работы сети – изолированная нейтраль, которая отличается более безопасными электрическими параметрами по сравнению с режимом заземленной нейтрали трансформатора. Схема действия электропоражающего фактора поясняется рисунком 1.18, где представлены различные варианты прикосновения человека к фазам сети. Вариант прикосновения к фазе человека, находящегося на абсолютно изоляционном основании, относится к безопасным, однако в реальных условиях он маловероятен. Наиболее опасным является состояние, когда человек касается одновременно двух фаз сети и попадает под действие линейного напряжения. Однако наиболее распространен вариант, когда человек касается одной фазы, но при этом имеет контакт с землей. В этом случае в качестве электропоражающего

фактора выступают активные и емкостные сопротивления изоляции кабелей. При этом активные сопротивления определяются техническим состоянием изоляции, а емкостные – их сечением и длиной. При наличии большого количества кабелей, что характерно для разветвленной сети участка, общее сопротивление сети обычно снижается настолько, что появляется реальный фактор электропоражения, а именно ток через тело человека может превышать 25 мА, а количество электричества может превышать 50 мА·с. В связи с этим применяющаяся аппаратура защиты от утечек тока на землю предусматривает функции выявления утечки, отключения сети, компенсации емкости сети. Состояния цепи однофазной утечки тока на землю соответствует схема замещения и векторная диаграмма (Рисунок 1.19).

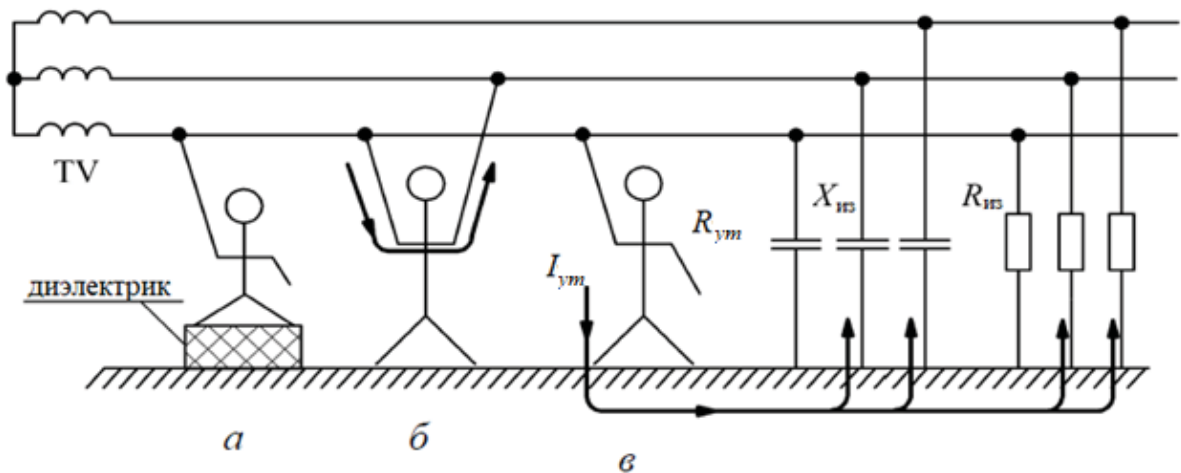


Рисунок 1.18 – Возможные варианты касания человеком токопроводящих элементов шахтной участковой сети: а – человек находится на диэлектрической основе, утечка тока отсутствует; б – касание двух фаз сети; в – однофазная утечка тока на землю через сопротивление $R_{ч}$ тела человека

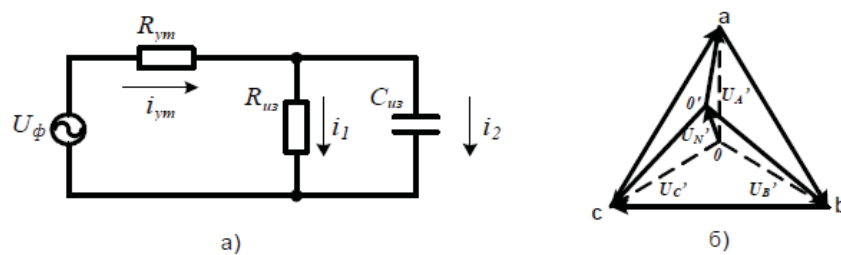


Рисунок 1.19 – Схема замещения участковой сети в случае касания человека к одной из фаз электросети (а) и векторная диаграмма (б)

Принцип выявления утечки тока на землю изначально был основан на подаче постоянного оперативного тока в контур фазы сети – сопротивления изоляции и «утечки – земля – измерительный элемент» (Рисунок 1.20,а). при этом команда на защитное отключение напряжения сети участка формировалось включением исполнительного реле в случае превышения оперативным током заданной уставки срабатывания [6, 7].

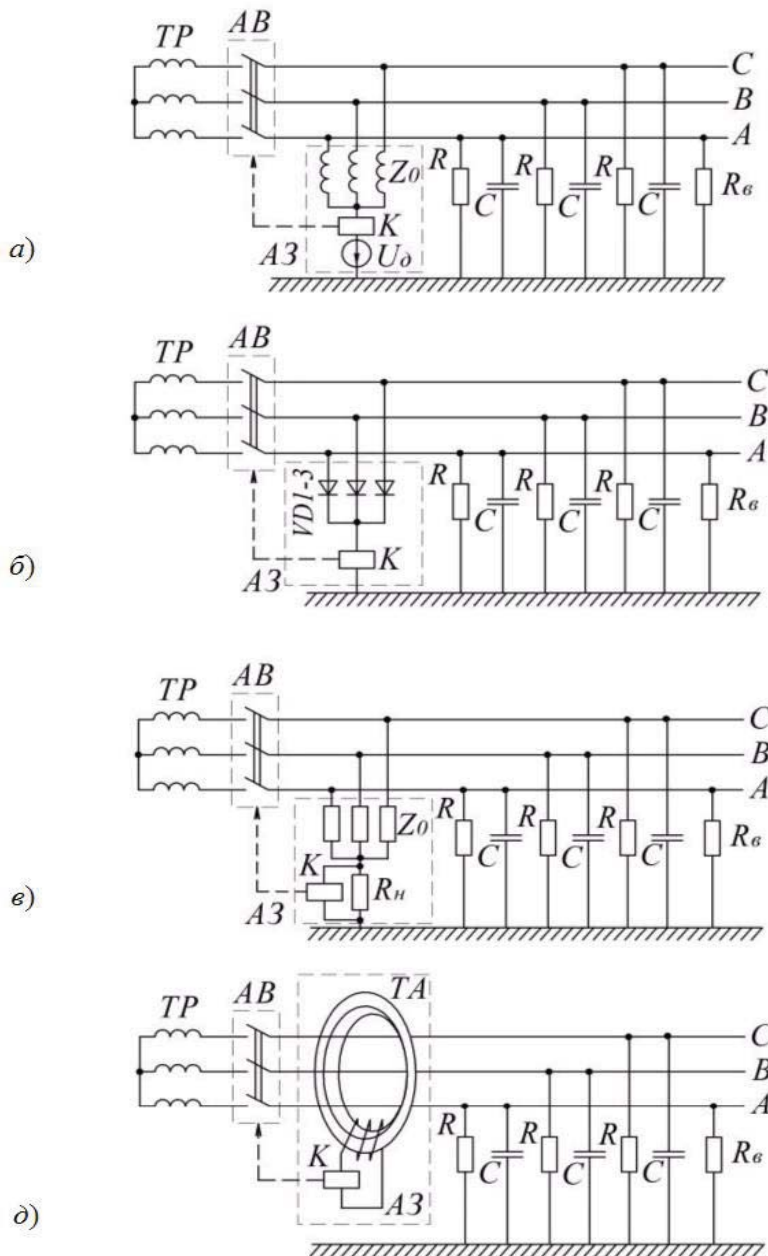


Рисунок 1.20 – Электрические схемы, поясняющие способы контроля сопротивления изоляции электросети относительно земли: наложение на сеть постоянного оперативного тока (а), контроль выпрямленных токов сети (б), контроль напряжения (в) и тока (д) нулевой последовательности [54]

Существенным недостатком данного способа явились повторяющиеся ложные срабатывания защиты, обусловленные кратковременными коммутационными перенапряжениями. Это послужило основой изменения подхода к контролю процесса возникновения утечки тока на землю.

Увеличение чувствительности к состоянию утечки тока на землю и точности отработки защитной функции на отключение при использовании реле в качестве измерительного элемента было достигнуто применением дифференциальных схем (Рисунок 1.21). Действие таких устройств основано на сравнении эталонного тока схемы аппарата защиты и оперативного тока, подаваемого в сеть.

Классическим примером реализации этого способа являются схемы аппаратов защиты типа УАКИ. В дальнейшем принцип сопоставления оперативного и «эталонного» токов был реализован в аппаратах защиты типов АЗПБ, АЗУР разных модификаций.

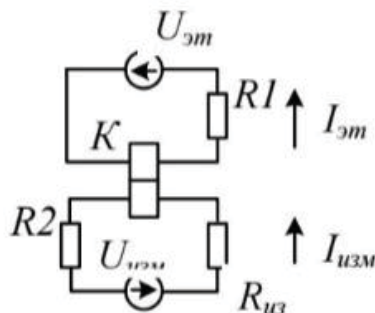


Рисунок 1.21 – Дифференциальная схема контроля сопротивления изоляции сети [56]

В качестве способа подавления электропоражающего фактора, обусловленного емкостью изоляции сети (Рисунок 1.22) является применение дросселей статической либо автоматической компенсации. В последнем случае выполняется процедура измерения емкости изоляции сети, формирование пропорционального постоянного тока и подача его в обмотку подмагничивания дросселя, рабочая обмотка которого включена в цепь оперативного тока [54]. Дополнительным средством повышения быстродействия обесточивания сети

напряжения 1140 В является устройство выявления поврежденной фазы и замыкание её на землю через резистор малого сопротивления [54].

Таким образом, электробезопасность эксплуатации шахтной участковой электросети достигается комплексом защитных функций, однако все они ориентированы на отключение энергетического потока формируемого ТП участка.

Защита не предусматривает реакцию на наличие обратного энергетического потока со стороны АД потребителей. Кроме этого, функция короткозамыкателя оказывается кратковременной и не распространяется на цепь утечки на землю, образованную на участке между пускателем и асинхронным двигателем.

Повышенным быстродействием реакции на применение конфигурации схемы подключенных силовых присоединений (потребителей) отличается способ компенсации емкости изоляции сети на основе непрерывной компенсации общей емкости 1 мкФ/фазу , созданной, частично, емкостью сети и, частично, дополнительными ёмкостями в схеме аппарата при условии быстродействующей коррекции этих дополнительных ёмкостей путем коммутации их составляющих при управлении процессом от микропроцессорного устройства измерения емкости сети (Рисунок 1.22) [7, 59, 60, 61].

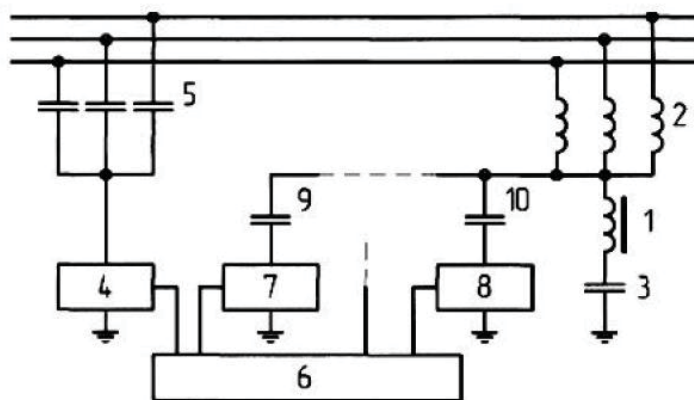


Рисунок 1.22 – Структурная схема устройства компенсации ёмкостных токов утечки: 1 – компенсирующий дроссель; 2, 5 – фильтры; 3, 9, 10 – конденсаторы; 4 – генератор тока повышенной частоты; 6 – блок управления; 7, 8 – коммутирующие ключи

Структура способа защиты от утечек тока на землю в сети 1140 В иллюстрируется схемой (Рисунок 1.23) и предусматривает применение короткозамыкателей поврежденной фазы, срабатывающих одновременно с защитным отключением сети. [14].

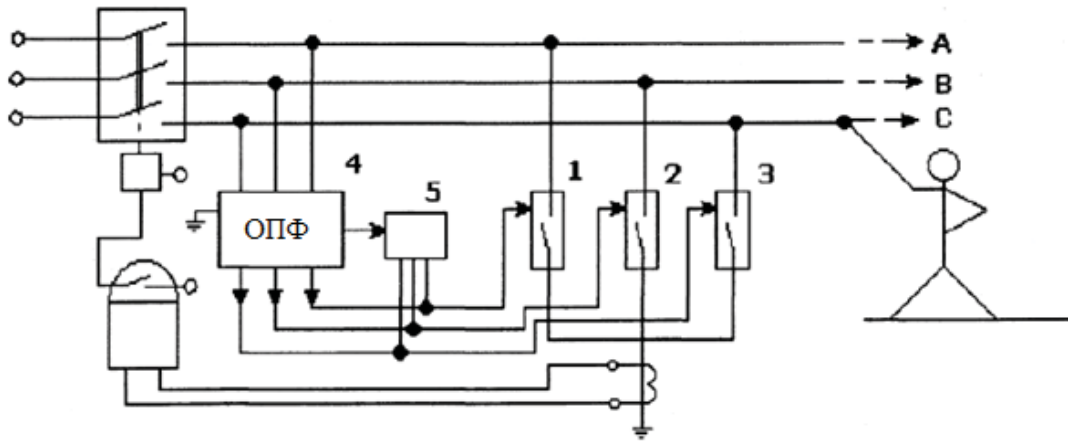


Рисунок 1.23 – Схема устройства применения защитного закорачивания на землю поврежденной фазы: 1-3 – фазные короткозамыкатели; 4 – блок определения повреждения фазы; 5 – блок управления короткозамыкателями

Таким образом, функция обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтного участкового электротехнического комплекса реализуется совокупностью технических решений в области быстродействующего выявления и обесточивания цепи утечки на землю (т.е. человека, прикоснувшегося к элементу электросети, находящемуся под напряжением). При этом защитная функция выражается в отделении от сети энергетического потока шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции методом автоматического защитного отключения [17]. Однако в этом случае после отключения автоматического выключателя ТП электробезопасность не может быть обеспечена на участке сети, который остаётся под воздействием обратных энергетических потоков АД потребителей (Рисунок 1.11)

Учитывая опасность, которую представляет процесс к.з. в электросети участка шахты, максимальная токовая защита в ЭТК участка многократно дублируется элементами прямого (расцепителем максимального тока

автоматических выключателей ТП и АВ) и косвенного действия. При этом защитные устройства сосредоточены в ТП, групповом АВ и магнитных пускателях (Рисунок 1.24).

Основной принцип определения тока к.з., который обрабатывается средствами максимальной токовой защиты шахтных участков сетей основан на сравнении фактического тока сети с предварительно заданной уставкой и формирование команд на отключение коммутационного аппарата в случае превышения эти током величины уставки. Отличительной особенностью устройств непрямого действия (УМЗ, ПМЗ, БТЗ, БКЗ-ЗМК и т.п.) является то, что измерительный параметр создается вторичными токами трансформаторов токовой защиты, сравнительная функция обрабатывается электронной схемой (повышающей точность защит) и предусматривает возможность регулирования уставки срабатывания.

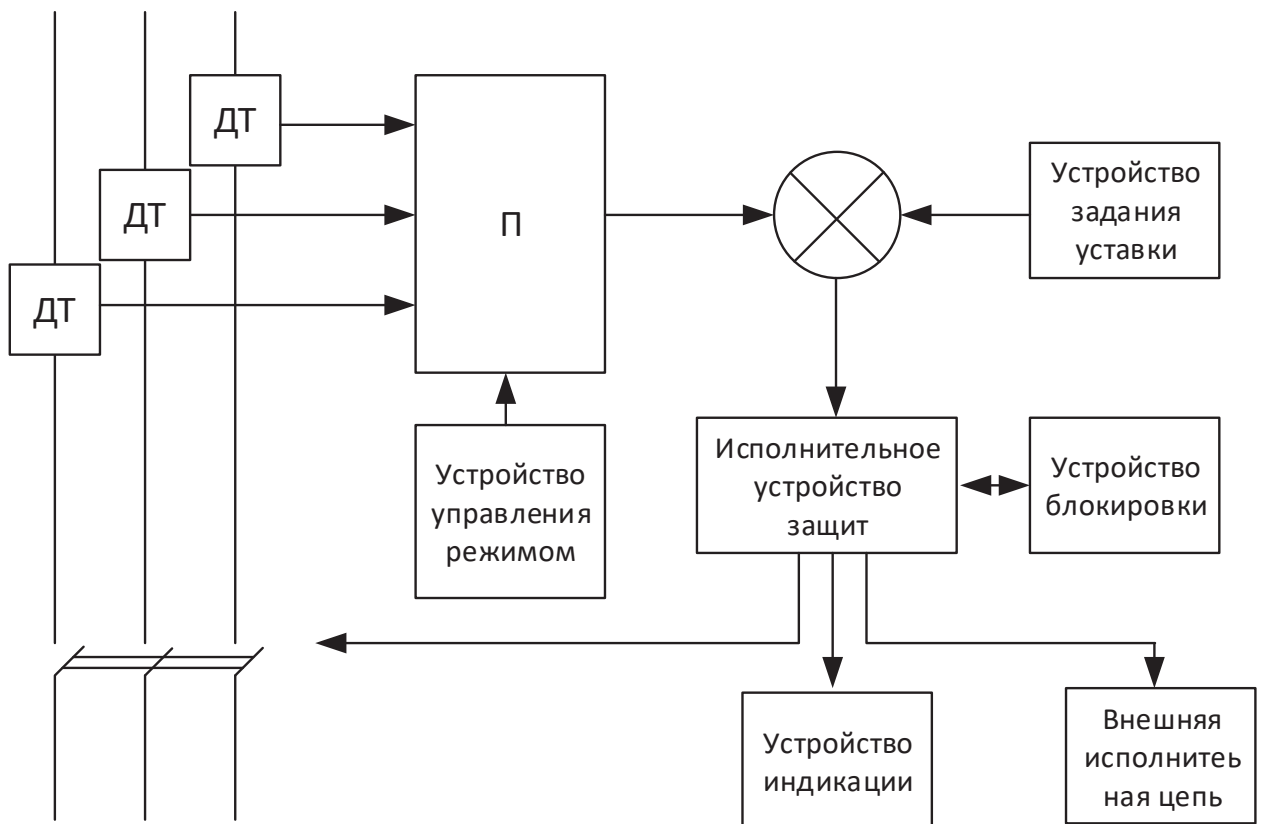


Рисунок 1.24 – Структурная схема блока максимальной токовой защиты:
 П – преобразователь; ДТ – датчики тока

Рассмотренные технические решения предполагают некоторую задержку (инерционность) срабатывания защиты на время измерения величины тока сети. В течение этого времени будет поддерживаться тепловая перегрузка аварийного силового присоединения. Однако, в опасных условиях шахты это время целесообразно минимизировать. Вариантами ускорения защитной функции могут быть: обесточивание защищаемой цепи включением короткозамыкателя сети на выходе АВ одновременно с защитным отключением последнего либо применение быстродействующих устройств выявления к.з. (на основе датчика тока «петля Роговского») [29], реализовано в схеме пускателя ПВИ-630МВ, либо на основе измерения скорости роста тока сети. Вариантом реализации является способ, заключающийся в фиксации смещения влево точки равенства мгновенных значений токов двух фаз (Рисунок 1.25) [54].

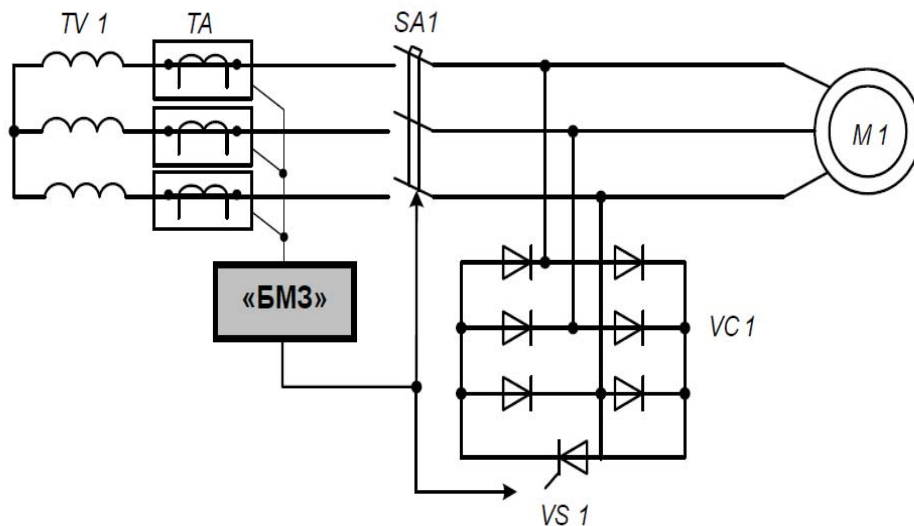


Рисунок 1.25 – Принцип токовой защиты закорачиванием выхода автоматического выключателя (SA1) в процессе защитного отключения аварийного присоединения

Действие быстродействующей максимальной токовой защиты (БМЗ) основано на измерении скорости нарастания тока и реагировании на превышение измеренным параметром заданного значения.

Применявшаяся в составе аппарата АВВ-250 быстродействующая токовая защита серии БМЗ функционировала на основе принципа безынерционного

формирования сигнала отпирания транзистора управляющего исполнительным устройством отключения. В сравнении с устройствами максимальной токовой защиты, реализующими принцип измерения действующего тока сети и сравнения его с выбранной уставкой срабатывания. Устройство БМЗ действительно отличается бóльшим быстродействием. Однако управляемый элемент р-п-р транзистор сам непосредственно является элементом инерционного действия поскольку величина коллекторного тока определяется величиной тока базы. Существенно бóльшим быстродействием отличается способ, основанный на выявлении эффекта смещения влево точки равенства мгновенных значений токов смежных фаз сети, что иллюстрируется рисунком 1.26 и реализуется на основе применения аналоговой и цифровой схемотехники.

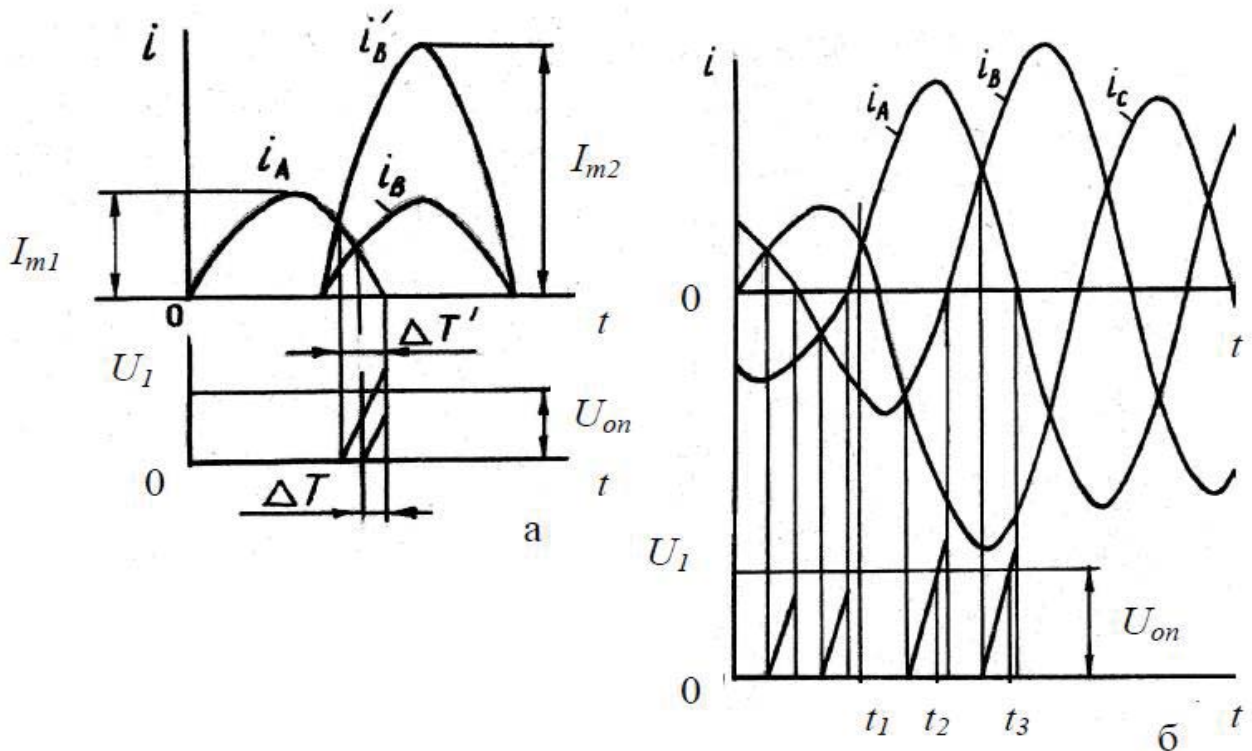


Рисунок 1.26 – Диаграммы электрических параметров способа определения смещения момента совпадения мгновенных значений токов смежных фаз трехфазной электросети:

а – токовая перегрузка сети;

б – трехфазное короткое замыкание (трехфазная система токов со стороны питающей трансформаторной подстанции)

Таким образом существующие средства максимальной токовой защиты и известные способы выявления тока к.з. позволяют с достаточным быстродействием формировать команду на защитное отключение сети при возникновении короткого замыкания.

В целом, известные промышленные варианты максимальных токовых защит УМЗ, ПМЗ, БТЗ и т.д. реализуют единый принцип функционирования (сравнение измеренного тока с заданным), отличаются схемами реализации, элементной базой, габаритами, спецификой присоединения индикаторов и элементов управления режимами («рабочий», «проверка», «взвод защиты») и уставками.

Принципиально важным является то, что область защитной функции распространяется на отделение от сети с цепью короткого замыкания энергетического потока участковой ТП. Кроме того, в настоящее время разработана теория выявления опасных состояний локальными защитными устройствами со стороны асинхронных двигателей. Тем не менее, отсутствуют приемлемые технические решения в области используемых устройств подавления обратных энергетических потоков, а даже предложенные варианты, как правило, не технологичны и их применение некорректно.

1.5 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования

Нестационарность технологических установок шахтных участков обуславливает необходимость применения гибких кабелей для передачи электроэнергии к силовым вводам их электроприводов. Такие кабели наиболее подвержены повреждениям в связи с отсутствием металлической брони, что создаёт опасность электропоражения, определяет возможность возникновения коротких замыканий, сопровождаемых значительным увеличением тока, тепловыми перегрузками в электрической сети, воспламенением электрооборудования.

Анализ существующих защит показывает, что их функции направлены на отключение энергетического потока ТП, от электрической сети технологического участка, однако защитная функция в виде отключения аварийного присоединения, либо всей сети не является достаточной, поскольку обратные энергетические потоки АД электропотребителей продолжают создавать условия для поддержания опасных состояний после защитного отключения напряжения питания на интервале выбега. При этом с увеличением мощности АД продолжительность его выбега возрастает пропорционально росту обобщенной индуктивности двигателя.

Исследованиями процессов возникающих в сети ЭТК после его защитного отключения установлено, что обратные энергетические потоки асинхронных электрических машин на начальном этапе своего возникновения способны поддерживать во включенном состоянии контакторы магнитных пускателей. При этом в сети создается обобщенный обратный энергетический поток, между отдельными потребителями протекают уравнивающие токи, а сами потребители АД в зависимости от своей мощности делятся на электрогенерирующие и электропотребляющие. В этом случае обратный энергетический поток асинхронной машины способен поддерживать ток к.з. в поврежденной кабельной сети, либо ток утечки на землю, (чем создает опасность электротравматизма). Данные аварийные и опасные состояния на интервале времени после отключения напряжения питания сети участка шахты не могут быть устранены существующими промышленными защитными устройствами. Следовательно, процесс перевода электросети участка шахты в безопасное состояние будет завершен только после исчезновения обратной ЭДС двигателей и ускорить этот процесс, а значит обеспечить безопасное состояние электрической сети участка шахты возможно путём принудительного подавления обратной ЭДС двигателей.

Анализ технических средств, разработанных для реализации функции подавления обратного энергетического потока, свидетельствует о достаточной степени проработки вопросов, относящихся к обоснованию способов выявления

аварийных состояний силового присоединения автономными техническими средствами, подключенными со стороны вводов статоров АД. В тоже время, задача быстродействующего автоматического подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей электропотребителей участка шахты не имеет законченного решения в виду отсутствия исполнительных устройств, адаптированных к применению в условиях шахты, в т.ч., при подключении со стороны силовых вводов статорных обмоток АД, а именно, устройств подавления обратных ЭДС с интенсивностью, обеспечивающей безопасное состояние шахтной участковой электрической чети на интервале времени после её защитного отключения. Указанные обстоятельства позволяет сформулировать следующую цель исследования.

Цель работы - обеспечение безопасных режимов работы шахтных участковых электрических сетей на основе ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей в процессе отключения путём управления параметрами их обратных ЭДС.

Задачи исследований:

- анализ исследований и разработок в области обеспечения безопасных условий эксплуатации шахтных участковых ЭТК, включая особенности проявления опасных состояний, особенности устройства и функционирования защит; анализ факторов опасности, обусловленных обратными ЭДС АД потребителей;

- исследование свойств управления электромагнитными параметрами АД, включая двухскоростные АД и эффект индукционно-динамического торможения АД, в контексте установления возможности подавления их обратных ЭДС на интервале выбега и обеспечения на основе этого состояния ЭТК участка шахты, соответствующего критериям безопасности эксплуатации;

- разработка исследовательских стендов и экспериментальные исследования процессов подавления обратных ЭДС АД обоснованными способами управления их электромагнитными параметрами;

- разработка схем устройств выявления аварийных и опасных состояний шахтного участкового ЭТК и устройств подавления обратных ЭДС АД потребителей в процессе и после защитного отключения электропитания.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЭДС АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВО ВЗАИМОСВЯЗИ С ФУНКЦИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Потенциально опасное состояние шахтной участковой электрической сети на временном интервале, следующем за моментом отключения напряжения питания, обусловлено функционированием асинхронного двигателя потребителя в режиме выбега, который в этом случае функционирует как электрогенерирующая установка, подавая в сеть ЭДС, индуктируемую вращающимся полем токов ротора. В общем случае, подавление обратного энергетического потока в сети предполагает формирование управляющего воздействия, приводящего к снижению амплитуды и продолжительности индуктирования обратной ЭДС АД. Комплексная оценка изменения время-амплитудного параметра обратной ЭДС АД должна рассматриваться в контексте соответствия критерию электробезопасности силовых присоединений АД и критерию устойчивости к воспламенению кабеля в месте возникновения к.з. В связи с этим, управление параметрами обратной ЭДС АД должно предусматривать максимальный уровень и максимальную интенсивность снижения её амплитуды.

С учётом того, что обратная ЭДС АД обусловлена динамическим электромагнитным состоянием асинхронной машины, представляется уместным реализовать процессом снижения этой ЭДС путём управления электромагнитным состоянием АД на интервале выбега.

В качестве вариантов могут быть рассмотрены как электрические, так и электромеханические параметры АД, определяющие амплитудно-частотные характеристики обратной ЭДС.

2.1 Свойства контура короткого замыкания в силовой цепи асинхронного двигателя в реализации функции подавления обратной ЭДС

В режиме свободного выбега ЭДС вращения АД индуцируется в статоре вращающимся полем токов ротора. Если пренебречь процессом экспоненциального затухания амплитуды и частоты ЭДС вращения (в процессе выбега ротора), то асинхронный двигатель может быть представлен схемой трансформатора, первичная обмотка которого имитирует ротор и присоединена к источнику ЭДС (ротора), а вторичная – статор и присоединена к активно-индуктивной цепи, имитирующей силовое кабельное присоединение статора [62, 63, 64]. Обратный энергетический поток АД, возникающий во вторичной обмотке, характеризуется такими параметрами, как величины напряжения и тока (при наличии нагрузки), а также их частота.

С целью исследования технических возможностей процесса управления электромагнитными параметрами АД в контексте создания условий ограничения параметров обратной ЭДС, предположим, что в магнитопроводе статора может быть установлена дополнительная трехфазная обмотка. Тогда к возможным способам ограничения напряжения и тока в цепи основной обмотки статора АД может быть отнесен процесс создания режима к.з. в этой дополнительной статорной обмотке. Реакцией двигателя на это, предположительно, станет повышение тока в обмотке ротора, что, в свою очередь, вызовет потерю напряжения в активно-индуктивной роторной цепи и, как следствие, снижение напряжения в основной обмотке статора [65, 66].

Рассмотрению подлежат параметры в цепи, имитирующей силовое кабельное присоединение статора, включая цепь междуфазного к.з., цепь утечки тока на землю (сопротивлением 1 кОм). Предполагается варьирование активно-индуктивными параметрами силового кабельного присоединения, а также параметрами емкости изоляции сети (т.е., имитацией возможной длины кабеля от АД до места повреждения). Выявленные параметры в силовом кабельном

присоединении должны быть соотнесены с аналогичными при отсутствии управляющего воздействия со стороны дополнительной обмотки статора.

Расчетная схема объекта исследования представлена на рисунке 2.1, где показаны трехобмоточный трансформатор с соответствующими присоединениями, имитирующими источник ЭДС ротора E , активные и индуктивные сопротивления жил кабеля ($L1$, $L2$, $R3$, $R4$), а также активные и емкостные сопротивления изоляции ($R7$, $C1$); цепь утечки представлена резистором $R6$. Представленная схема позволяет выполнить предварительный анализ процесса, установить общую тенденцию воздействия закорачивания дополнительной обмотки статора АД на характер изменения обратной ЭДС. При этом, могут быть определены электрические параметры в цепях каждой из обмоток с учетом коэффициента трансформации. Параметры обмоток $W1$ и $W2$ должны соответствовать параметрам обмоток статора и ротора реального асинхронного двигателя, а параметры обмотки $W3$ могут варьироваться.

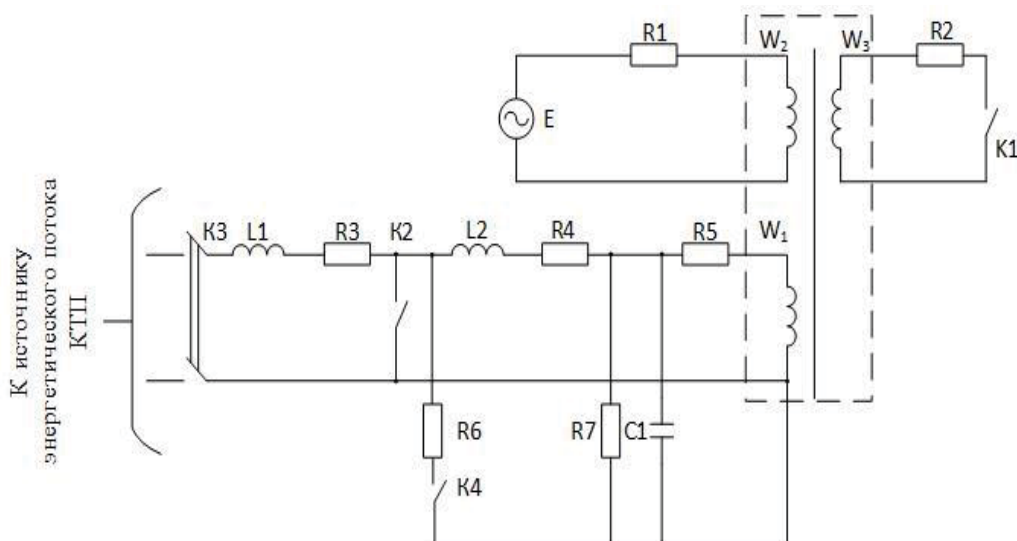


Рисунок 2.1 – Схема модели имитации процесса подавления энергетического потока электрической машины

Указанной структуре соответствует компьютерная модель [67, 68, 69, 70] (Рисунок 2.2). Точками контроля тока являются: $A1$ – на вводе генерирующей (роторной) обмотки $W2$; $A2$ – участок короткого замыкания; $A3$ – дополнительная обмотка закорачивания; $A4$ – величина тока утечки на землю; $A5$ - количество электричества.

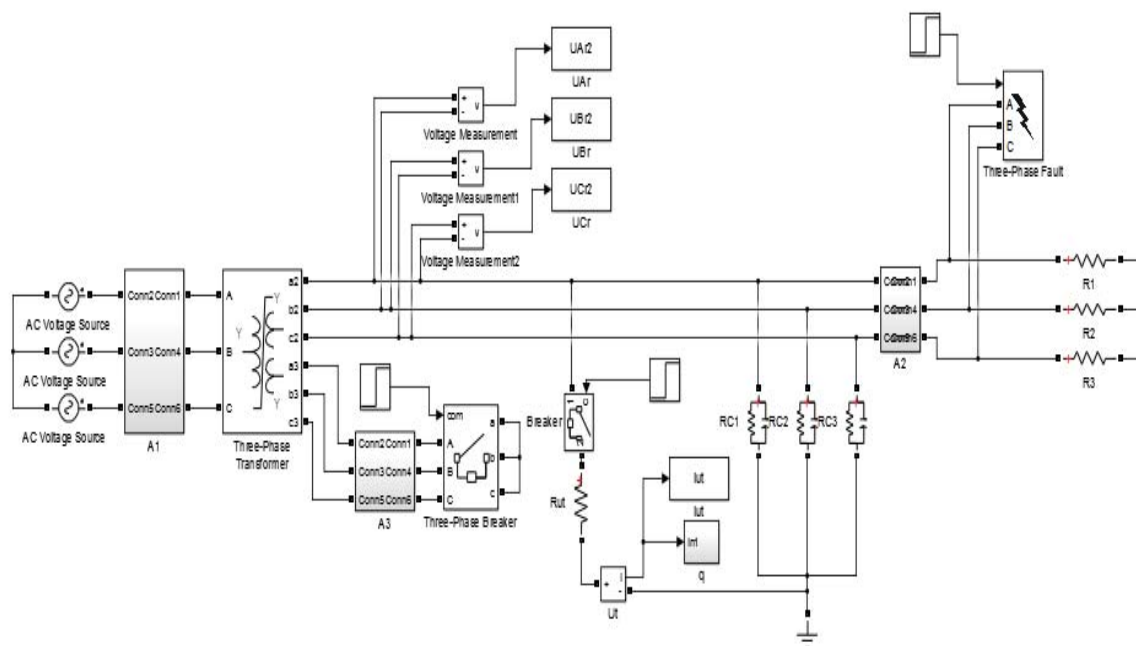


Рисунок 2.2 – Структура компьютерной модели трехфазной трансформаторной системы

Контролируемые параметры в указанных точках описываются зависимостями:

- в точке $A1$ – ток, обусловленный действием напряжения источника питания;

- в точке $A2$:

$$i_k = i_{\Pi} + i_a = \left(\frac{U_{max}}{Z_k} \right) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{\alpha(t=0)} e^{(-t/T_a)}, \quad (2.1)$$

где i_k, i_{Π}, i_a – ток короткого замыкания до точки к.з., его периодическая и апериодическая составляющие, соответственно; Z_k – полное сопротивление цепи к.з.; φ_k – угол сдвига тока относительно напряжения; $T_a = x_k/(\omega r_k)$ – постоянная времени цепи к.з.; α – фаза включения короткого замыкания; x_k, r_k – индуктивное и активное сопротивление цепи к.з., соответственно

- в точке $A3$ [71]:

$$i_k = i_{уст} + i_{св} = 100\sqrt{2}I_{НОМ}/u_k [\sin(\alpha_0 - \varphi_k) - \sin(\alpha_0 - \varphi_k) e^{-\left(\frac{R_k}{L_k}\right)t}], \quad (2.2)$$

где $i_k, i_{уст}, i_{св}$ – ток короткого замыкания трансформатора, установившаяся и свободная составляющие тока, соответственно; $\varphi_k = \arctg(X_k/R_k)$

Цепь утечки тока на землю имитируется сопротивлением резистора (1 кОм) R_{ut} , а цепь междуфазного короткого замыкания в присоединении кабеля статора имитируется ключами *Three Phase Fault*. При этом вводится допущение о фиксированном времени (продолжительности) действия обратного энергетического потока электрической машины (в присоединении кабеля статора 5 с, а также о неизменности величины и частоты ЭДС, генерируемой трехфазным источником (что допустимо на начальном этапе исследования модели и соответствует экстремальным параметрам опасного состояния объекта).

В ходе исследований приняты следующие допущения и состояния:

- параметры обмоток W_1 и W_2 соответствуют активным и индуктивным сопротивлениям, соответственно, обмоток статора и ротора АД типа ЭКВК 4-220 мощностью 220 кВт;

- величина фазной ЭДС источника 380 В, что соответствует ЭДС ротора указанного АД, вращающегося с номинальной угловой скоростью в режиме выбега, частота ЭДС – 50 Гц;

- принимаются сечения кабеля марки КГЭШ в присоединении статора (W_1) 25 мм², 35 мм², 50 мм², 70 мм², 95 мм²;

- длина указанного кабеля варьируется от 10 м до 300 м;

- место возникновения утечки тока на землю в указанном кабеле варьируется в пределах 10 м – 250 м от места подключения обмотки W_1 .

Параметры системы измеряются для состояний:

- создана цепь утечки тока на землю в присоединении обмотки W_1 ; в присоединении обмотки W_3 цепь к.з. не создана;

- создана цепь утечки тока на землю в присоединении обмотки W_1 ; в присоединении обмотки W_3 цепь трехфазного к.з. создана спустя Δt (диапазон Δt составляет 2 с – 20 с);

Общий вид полученных диаграмм представлен на рисунке 2.3.

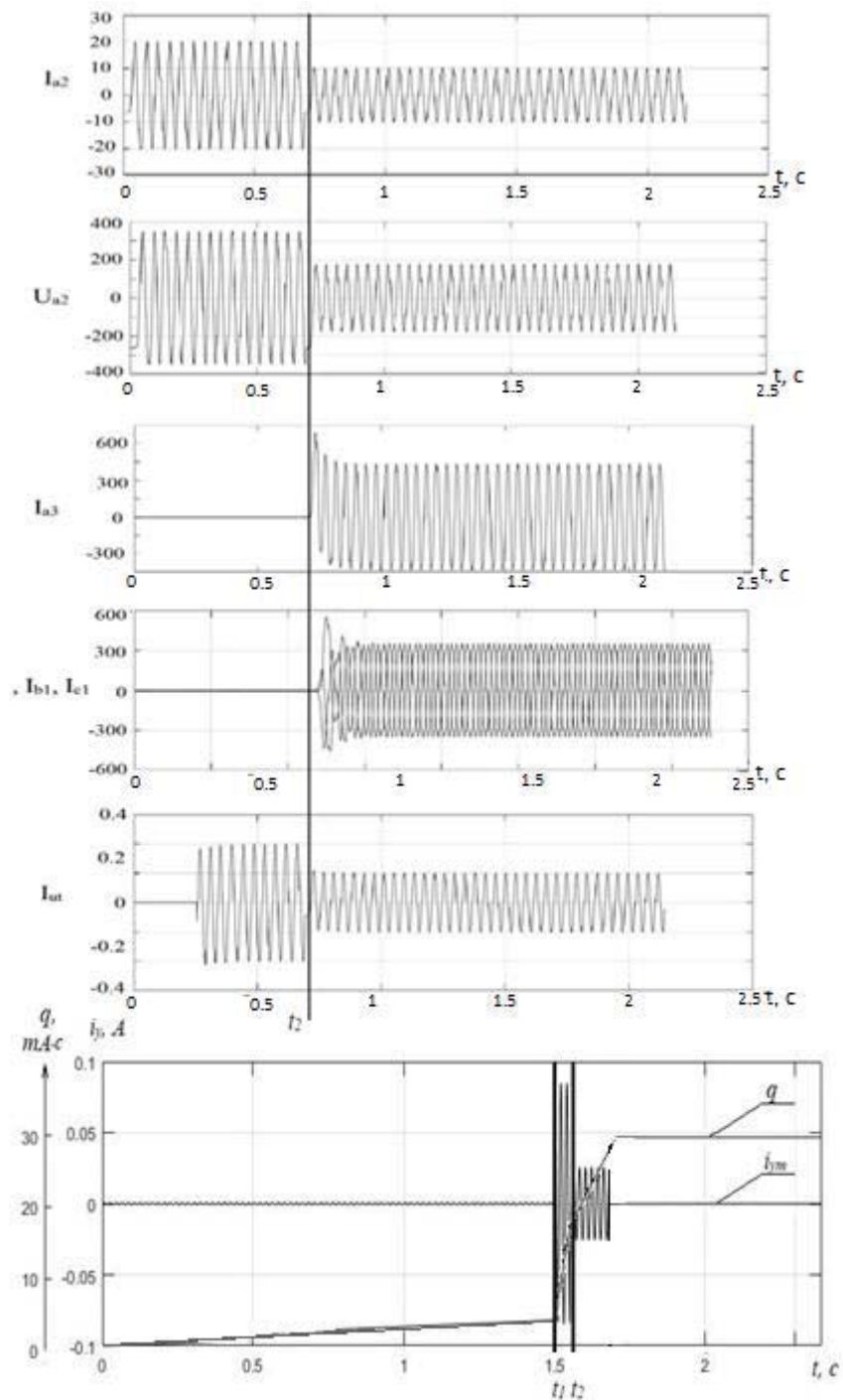


Рисунок 2.3 – Диаграммы изменения токов и напряжений в трансформаторных обмотках: I_{a2} , U_{a2} – ток (А) и напряжение (В) в фазе А рабочей обмотки трансформатора (W_1); I_{a3} – ток фазы А дополнительной обмотки закорачивания (W_3), А; I_a , I_b , I_c – ток фазы А, В, С генерирующей (роторной) обмотки W_2 , А; I_{ut} – ток утечки на землю, мА; q – количество электричества, мА·с; t_1 – момент создания к.з. в дополнительной обмотке W_3

С учетом варьирования параметров силовых присоединений, результаты исследований обобщены, что позволило выявить общую тенденцию в отношении снижения величин, составляющих параметры обратного энергетического потока асинхронного двигателя в результате воздействия на его электромагнитные параметры. Установлено, что создание к.з. в дополнительной обмотке W_3 , способствует снижению тока в цепи утечки, а также ограничению количества электричества q (Рисунок 2.3 – момент времени t_1).

Указанные параметры могут быть отнесены к предельно возможным, поскольку реально ЭДС вращения двигателя находящегося в режиме выбега не остается неизменной по амплитуде и частоте, а снижается экспоненциально с постоянной времени двигателя [62].

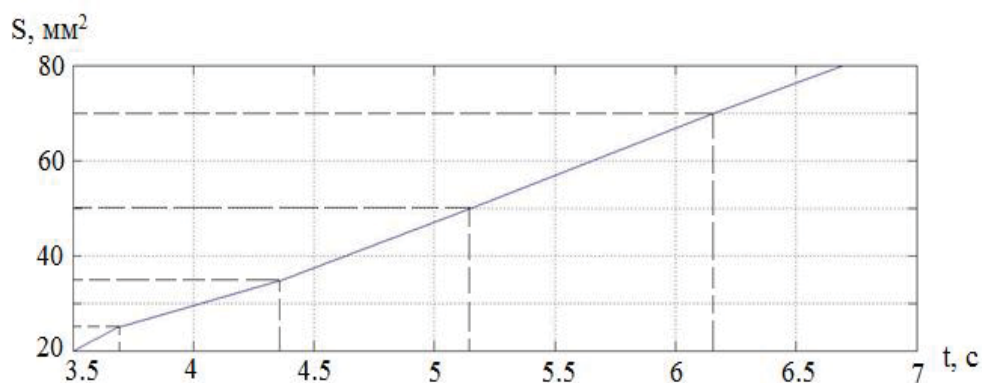


Рисунок 2.4 – Результат определения допустимого времени существования обратного энергетического потока в цепи силового присоединения статора АД типа ЭКВК 4-220 в зависимости от площади сечения жил гибкого кабеля при условии закорачивания дополнительной обмотки статора с учетом выполнения критерия электробезопасности ($q=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$)

Анализ графика (Рисунок 2.4) показывает, что в случае применения защитного закорачивания дополнительной обмотки статора, в момент возникновения цепи утечки тока на землю, может быть создан эффект снижения количества электричества до уровня, соответствующего критерию электробезопасности ($q=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$) в течение времени, достаточного для завершения формирования обратного энергетического потока в двигателе,

находящемся в режиме выбега. Моделирование проводилось при условии неизменности величины обратной ЭДС. С учетом реально существующего экспоненциального закона ее снижения рассматриваемые параметры электробезопасности могут быть улучшены.

Влияние сечения кабеля (в диапазоне 35 мм^2 ; 50 мм^2 ; 70 мм^2 ; 95 мм^2) и его длины от статора АД до места повреждения (в диапазоне 10-200 м) даёт следующий диапазон результатов (Рисунок 2.5).

Полученные предварительные результаты позволяют выполнить следующий шаг исследования, а именно, установить предельные параметры дополнительной (закорачиваемой) обмотки статора АД и их соотношение с параметрами основной (рабочей) обмотки статора, при которых могут быть достигнуты предельные безопасные уровни тока в кабельном присоединении статора АД (в пределе – на силовых клеммах статора) и количества электричества в цепи утечки тока на землю (в силовом присоединении статора АД) за фиксированное время 5 с. Применительно к имитатору АД типа ЭКВК4-220 получены следующие результаты (Рисунок 2.6).

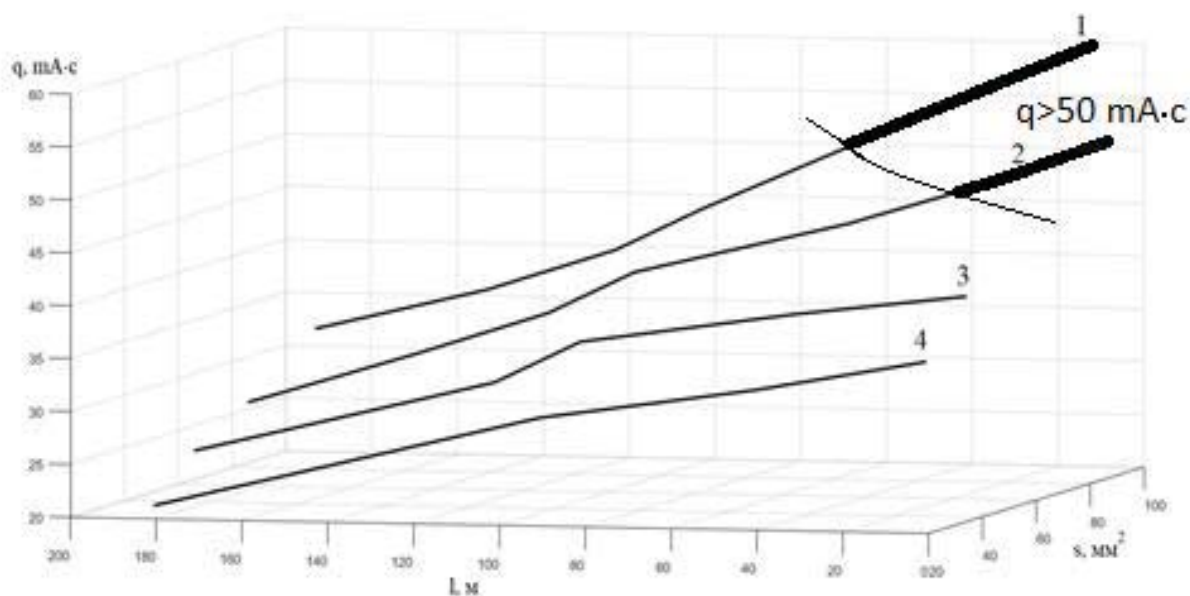


Рисунок 2.5 – Зависимость величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1 \text{ кОм}$) от сечения и длины кабеля: 1 - сечение 95 мм^2 , 2 - сечение 70 мм^2 , 3 - сечение 50 мм^2 , 4 - сечение 35 мм^2

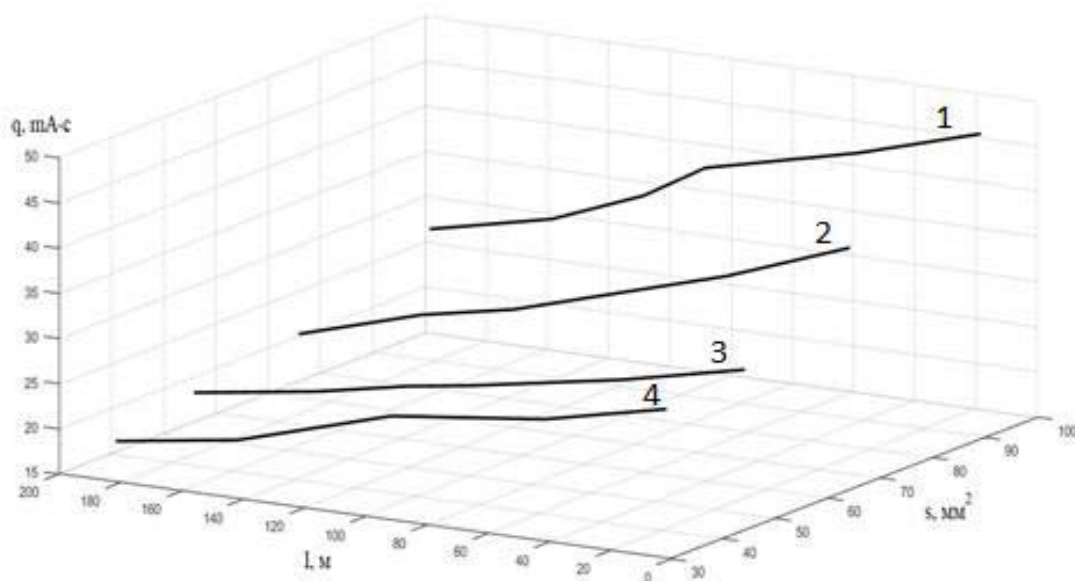


Рисунок 2.6 – Зависимость величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) от сечения и длины кабеля: 1 - сечение 95 мм^2 , 2 - сечение 70 мм^2 , 3 - сечение 50 мм^2 , 4 - сечение 35 мм^2 (предельные параметры дополнительной обмотки $X=0,000328$ Гн)

2.2 Исследование процесса подавления обратной ЭДС двухскоростного двигателя методом закорачивания отключенной обмотки статора

На основании результатов моделирования установлена принципиальная возможность ускорения ограничения параметров обратной ЭДС АД в режиме выбега путем создания контура короткого замыкания в специально созданной дополнительной не подключенной к сети обмотке статора. Однако недостаток такого решения связан с необходимостью принципиального изменения конструкции АД и оснащения этой электрической машины дополнительной трехфазной обмоткой статора. В то же время, существует целый класс асинхронных машин, содержащих две статорные обмотки. Это двухскоростные рудничные АД, предназначенные для электроприводов шахтных конвейеров [62].

Специфика конструкции двухскоростного АД, существенно отличающая процессы подавления его обратного энергетического потока от объекта, рассмотренного ранее, заключается в различии числа полюсов двух обмоток статора, размещенных на общем магнитопроводе. Так, согласно [54, 72] обмотка статора номинальной скорости содержит 4 полюса, а статора пониженной скорости – 12 полюсов (Рисунок 2.7). Это будет определять формирование в не подключенной к сети обмотке статора трансформаторной ЭДС, отличной по частоте от частоты сети, а по форме – от синусоиды.

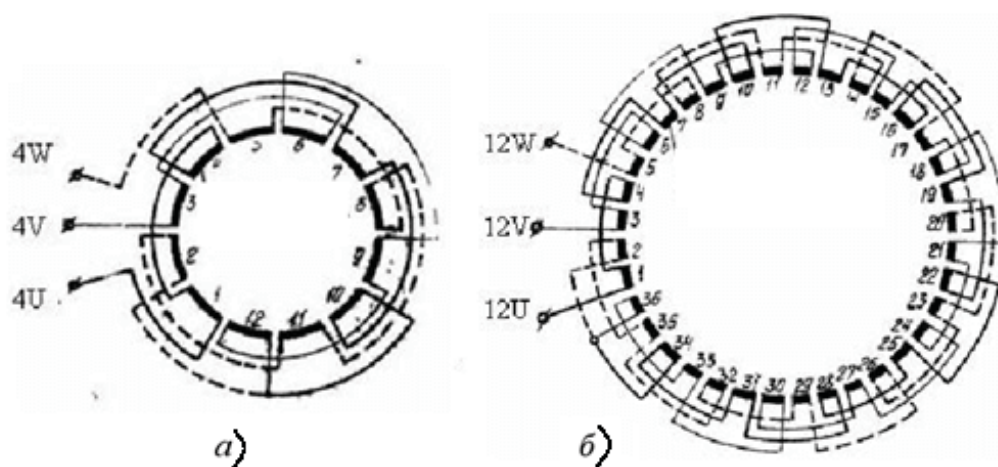


Рисунок 2.7 – Схемы обмоток статора двигателя серии ЭДКВФ:

a – обмотка номинальной скорости, число полюсов $2p=4$;

б – обмотка пониженной скорости, число полюсов $2p=12$

Логично предположить, что процесс формирования ЭДС отключенной обмотки статора в значительной степени определяется конструктивными особенностями и динамическими характеристиками электромагнитной системы «статор *I* – ротор – статор *II*» асинхронного двигателя.

Для установления факторов, представляющих опасность электропоражения и обусловленных индуктированием ЭДС в отключенной обмотке статора двухскоростного АД научную и практическую актуальность представляет задача создания и исследования модели ЭДС процессов в указанной обмотке с учетом реальных параметров двигателя и питающей электрической сети (одна из статорных обмоток в этом случае включена в сеть).

В связи с этим, в качестве исходных данных модели следует учесть форму и геометрию пазов магнитопровода статора, особенности закладки и распределения в этих пазах статорных обмоток, величину воздушного зазора между магнитопроводом статора и ротора, форму и геометрию магнитопровода ротора и угловую скорость его вращения, как параметр, устанавливающий частоту перекрытия пазов статора магнитопроводящим материалом фрагментов магнитной системы ротора.

В обобщенной форме процессы, происходящие в двухскоростном двигателе, могут быть представлены моделью однофазного трансформатора при поочередном перекрытии его магнитной системы магнитопроводом, при этом частота перекрытий может меняться, что соответствует процессам при работе двигателя. В частности, процессы могут быть описаны взаимным действием ЭДС в общей сети. Применительно к обмотке пониженной скорости двухскоростного асинхронного двигателя делаем вывод о существовании дополнительной трансформаторной ЭДС, обусловленной трансформаторными связями. Таким образом предполагается наличие двух источников ЭДС: ЭДС частот 50 Гц (источник питания) частоты, определенной соотношением числа пар полюсов.

Рассмотрим простейший случай – процессы при поочередном перекрытии П-образного магнитопровода однофазного трансформатора магнитопроводящей средой. Схема замещения магнитной цепи трансформатора представлена на рисунке 2.8, где обозначено: F_1, F_2 – магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток соответственно; Φ_1, Φ_2 – магнитные потоки; Φ_s – магнитный поток рассеяния; U_{M1}, U_{M2} – падение магнитного напряжения на первичном и вторичном стержнях магнитопровода; U_{zaz1} – магнитное напряжение воздушного зазора между первичным стержнем и ярмом, U_{zaz2} – магнитное напряжение на воздушном зазоре между вторичным стержнем и ярмом; U_{z1}, U_{z2} – магнитное напряжение на левой и правой половинах ярма.

Математическое описание электромагнитной системы трансформатора представлено следующими уравнениями [73, 74, 75, 76]:

Магнитодвижущая сила первичной обмотки:

$$F_1 = U_{zaz1} + 2 \cdot U_{z1} + U_{M1} + U_S \quad (2.4)$$

Магнитодвижущая сила вторичной обмотки:

$$F_2 = U_{zaz2} + 2 \cdot U_{z2} + U_{M2} - U_S \quad (2.5)$$

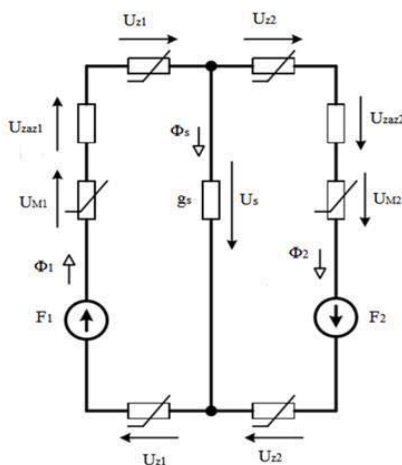


Рисунок 2.8 - Схема замещения магнитной цепи трансформатора

Магнитный поток в цепи:

$$\Phi_S = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.6)$$

На всех участках магнитопровода напряженность магнитного поля H связана с магнитной индукцией B соотношением $H = f(B)$, составляемым по таблице или графику намагничивания. В данной модели она задана таблично.

Структура компьютерной модели электромагнитной системы трансформатора представлена на рисунке 2.9 [77, 78].

Напряжённость магнитного поля вычисляется исходя из:

$$H = \frac{B}{\mu_0}, \quad (2.7)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Составив математическое описание электромагнитной системы трансформатора и реализовав вычисление программными методами получена осциллограмма напряжений на вторичной обмотке трансформатора (Рисунок 2.10, Рисунок 2.11) с формой ЭДС близкой к реально существующей.

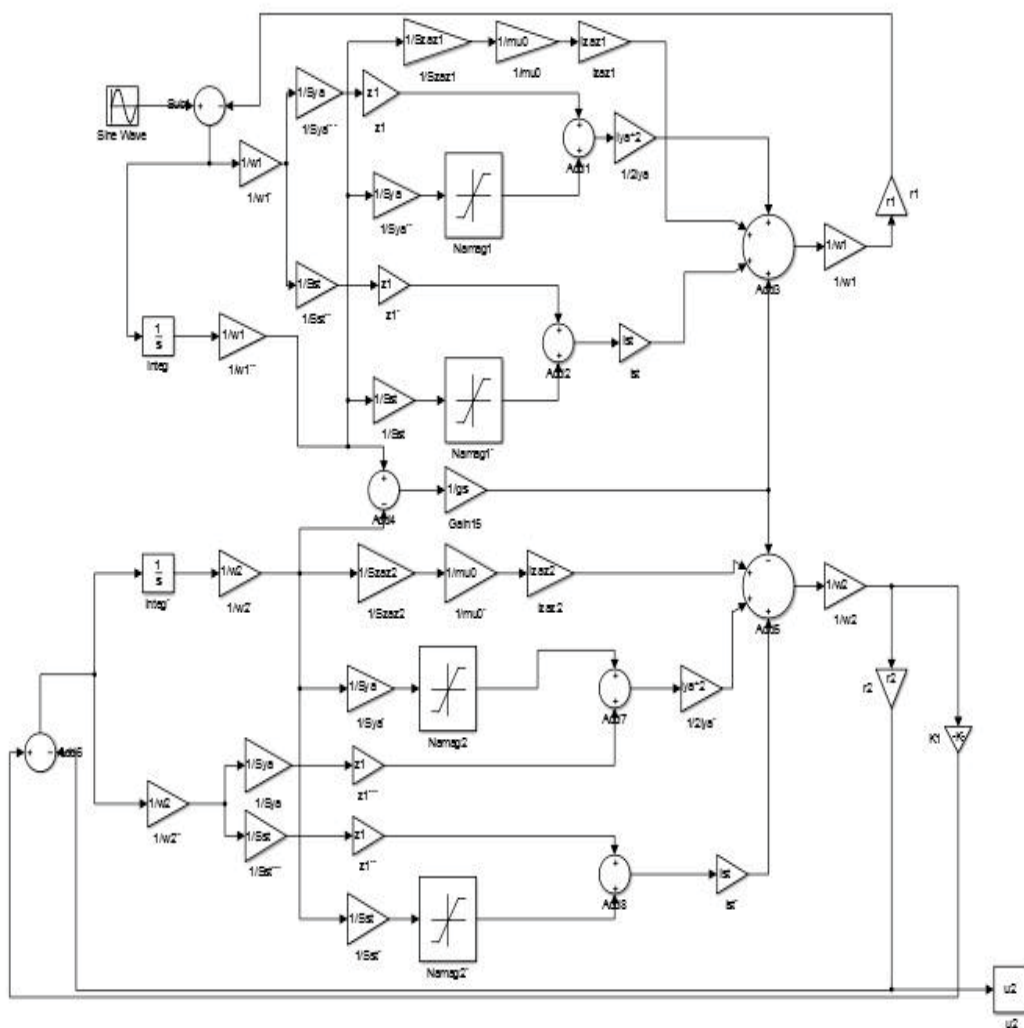


Рисунок 2.9 - Структура компьютерной модели электромагнитной системы трансформатора

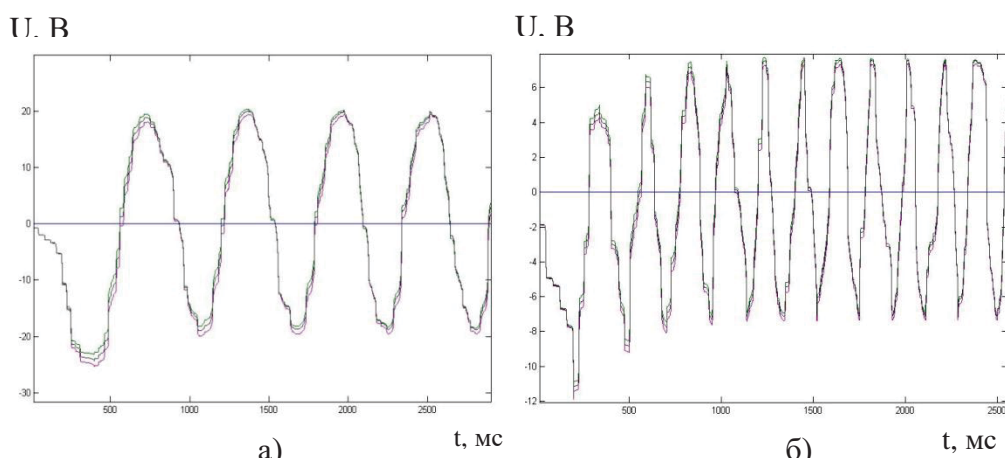


Рисунок 2.10 - Осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора при: а) амплитуде 100В, частоте 70π рад/с; б) амплитуде 100В, частоте 200π рад/с

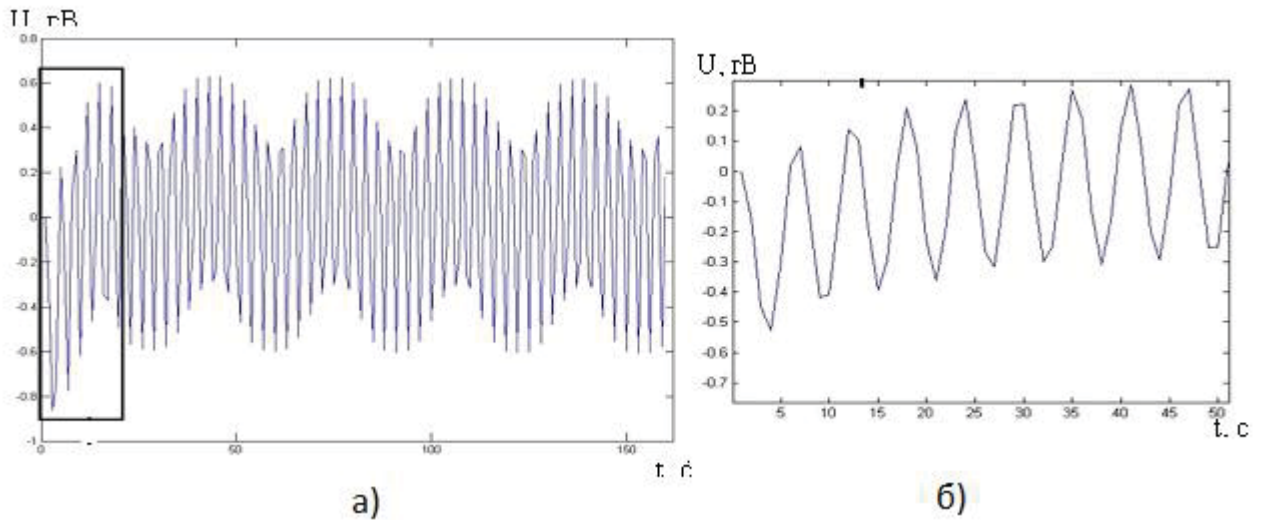


Рисунок 2.11 - Осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора при амплитуде 50В, частоте 100π рад/с

Таким образом, задание в частоте и очередности перекрытия воздушных зазоров магнитопроводящим материалом позволило получить формы ЭДС с искажениями близкими к реально существующим (Рисунок 2.12) [54]. Следовательно, данный подход может быть применен при исследовании уточненной модели двухскоростного асинхронного двигателя на основе представления его в виде совокупности трансформаторных компонентов.

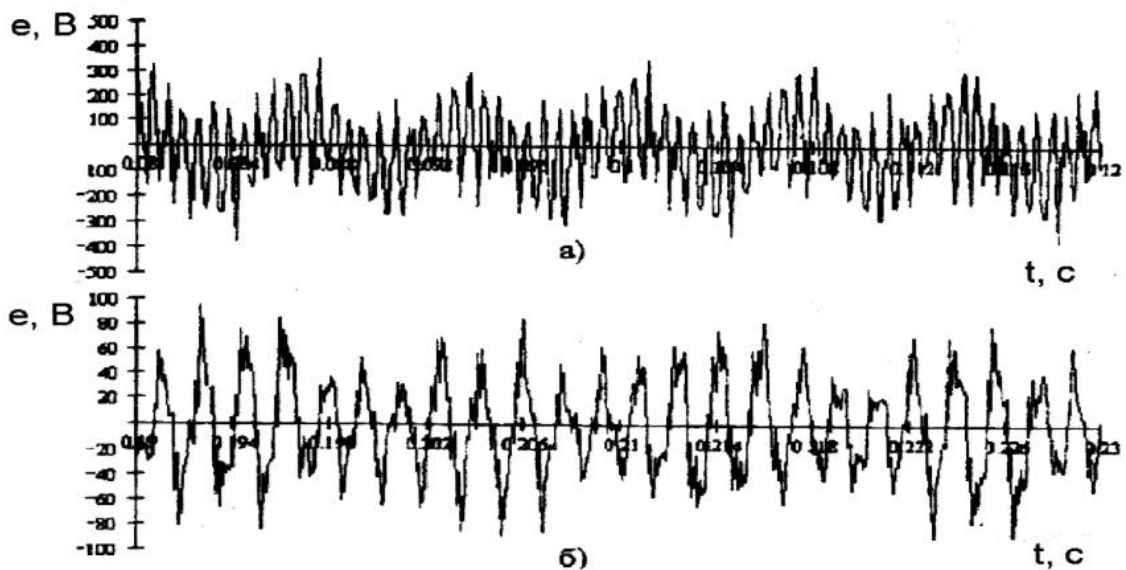


Рисунок 2.12 – Осциллограммы вторичных ЭДС АД в обмотках пониженной (а) и номинальной (б) скоростей

В частности, на первом этапе должны быть определены закономерности формирования трансформаторной ЭДС в отключенной обмотке статора работающего двухскоростного АД. Общий подход к решению задачи этого этапа может быть построен на основе исследований [79] и состоять в следующем порядке действий: определение взаимной индуктивности между подключенной обмоткой статора и ротора в функции угла поворота ротора; определение мгновенных значений токов фаз подключенной обмотки статора и ротора; вычисление распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя как функции времени на основе информации о мгновенных значениях токов; расчет ЭДС пазовых проводников отключенной обмотки; определение ЭДС, которая наводится в каждой фазе отключенной обмотки, путем суммирования ЭДС пазовых проводников с учетом схемы соединения обмотки.

Процедурой определения взаимной индуктивности ротора и обмоток статора АД предусматривается выполнение расчета индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором (путем суммирования индукций статора и ротора). Согласно [79, 80] индукция результирующего поля в области каждого паза представляется в виде наложения индукции непарного поля от тока паза (с учетом предположения об отсутствии поля внешнего по отношению к пазу) и индукции парного поля (внешнего по отношению к пазу) пазов магнитопровода (с учетом предположения об отсутствии тока в данном пазу). При вычислении индукции парного и непарного полей в области каждого паза учитываются магнитодвижущие силы соответствующих катушек обмоток. Расчет потокосцепления фазной обмотки в этом случае выполняется на основании предварительного расчета суммы потокосцеплений обмоток, принадлежащих одной и той же фазе, с учетом сформированных пар полюсов. Делением потокосцепления фазы на ее ток (при отсутствии тока в других фазах статора и ротора) определяются величины собственных и взаимных индуктивностей ротора и обмоток статора [79].

Рассмотрим процесс формирования ЭДС в отключенной обмотке статора, работающего АД в составе типового шахтного участкового электротехнического

комплекса (Рисунок 2.13) применительно к электрической машине типа АДВК-355LA12/4 (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

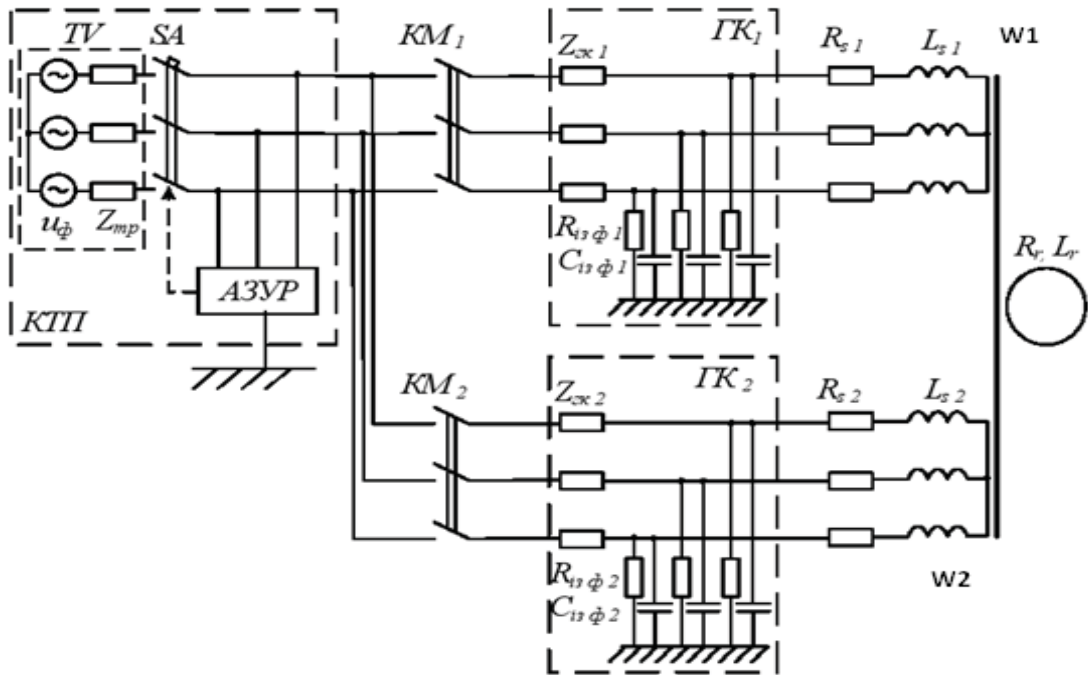


Рисунок 2.13 - Схема шахтного участкового ЭТК с двухскоростным АД: TV – трёхфазный источник питания (трансформаторная подстанция с автоматическим выключателем SA); $АЗУР$ – аппарат защиты от утечки тока на землю; KM_1-KM_2 - коммутационные аппараты; $ГК_1-ГК_2$ - гибкие кабели; $R_{s1}, R_{s2}, L_{s1}, L_{s2}$ – активные сопротивления и индуктивности статоров; $Z_{мп1}, Z_{эк1}, Z_{эк2}$ – соответственно, полные сопротивления трансформатора и гибких кабелей $ГК_1$ и $ГК_2$; $R_{из\phi 1}, R_{из\phi 2}, L_{из\phi 1}, L_{из\phi 2}$ – сопротивления и ёмкости изоляции кабельной сети; $W1; W2$ - обмотки статора АД

Для определения взаимной индуктивности $M(\theta) = \psi_{ra} / i_{sa}$, показывающей зависимость потокосцепления ψ_{ra} фазы ротора от тока i_{sa} фазы статора в функции угла θ поворота ротора, рассматривается случай подключения обмотки фазы статора к источнику тока, изменяющегося синусоидально с амплитудой 1А и частотой 50 Гц. Предполагается, что за период 0,02 с изменения тока ротор поворачивается на 2π рад. Путем интегрирования индукции в воздушном зазоре в пределах размещения каждой катушки статора, с учетом длины

магнитопровода, вычисляется значение потокосцепления каждой катушки статора для каждого момента времени. Потокосцепление фазных обмоток статора определяется расчетом суммы потокосцеплений соответствующих катушек. Аналогично вычисляются потокосцепления фаз ротора.

Величина $M(\theta) = \psi_{ra}/i_{sa}$ является четной функцией, для которой постоянная составляющая тригонометрического ряда Фурье равна нулю, $a_0=0$, и амплитуды синусоидальных составляющих являются нулевыми, $b_k=0$, то есть при анализе можно ограничиться определением только амплитуд a_k косинусоидальных составляющих. Зависимость $M(\theta)$ для параметров рассматриваемого двигателя представлена выражением:

$$M(\theta) = 8,57 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(2\theta) + 4/12 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6\theta) + 2,66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(34\theta) - 2,95 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(38\theta) \quad (2.8)$$

Отклонение полученных согласно уравнению (1) значений взаимной индуктивности $M(\theta)$, при учете только 2, 6, 34, 38 гармоник, от значений, рассчитанных по кривой индукции, не превышает 3 %, что допустимо для инженерных расчетов. Это позволяет упростить дальнейшие расчеты учетом только указанных гармоник для анализа кривой взаимной индуктивности статора и ротора.

Матричное дифференциальное уравнение, описывающее переходные процессы в АД с короткозамкнутым ротором относительно составляющих потокосцеплений с учетом угла поворота ротора θ , представляется следующим выражением [79, 80, 81]:

$$\frac{d\bar{\psi}_{AD}}{dt} = \bar{F}_{AD} \cdot \bar{\psi}_{AD} + \bar{G}_{AD} \cdot \bar{S}_{AD} + \bar{H}_{AD} \cdot \bar{U}_{AD} \quad (2.9)$$

где $\bar{\psi}_{AD} = [\psi_{s\alpha} \ \psi_{s\beta} \ \psi_{r\alpha} \ \psi_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$ – вектор переменных состояний; \bar{G}_{AD} , \bar{H}_{AD} – матричные константы; $\bar{S}_{AD} = [-\omega\psi_{r\beta} \ \omega\psi_{r\alpha} \ (M_e - M_c)/J]^T$ – вектор нелинейных

соотношений между переменными состояниями; $\bar{U}_{AD} = [u_{AB} \ u_{BC} \ u_{CA}]^T$ – вектор линейных напряжений статора; $\bar{F}_{AD} = \bar{R} \cdot \bar{M}^{-1}(\theta)$, причем \bar{R} матрица, учитывающая сопротивления контуров статора и ротора; $\bar{M}^{-1}(\theta)$ – матрица, обратная к матрице индуктивностей $\bar{M}(\theta)$ двигателя:

$$\bar{M}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M_3 & M_4 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & -M_4 & M_3 & 0 & 0 \\ M_3 & -M_4 & L_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_4 & M_3 & 0 & L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.10)$$

$$\bar{M}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 / M_{10} & 0 & M_3 / M_{10} & -M_4 / M_{10} & 0 & 0 \\ 0 & L_1 / M_{10} & M_4 / M_{10} & -M_3 / M_{10} & 0 & 0 \\ -M_3 / M_{10} & -M_4 / M_{10} & L_1 / M_{10} & 0 & 0 & 0 \\ M_4 / M_{10} & -M_3 / M_{10} & 0 & L_1 / M_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

причем

$$M_{10} = L_1^2 - M_3^2 - M_4^2; \quad (2.12)$$

$$M_3 = M(\theta) - \frac{M(\theta - \rho)}{2} - \frac{M(\theta + \rho)}{2}; \quad (2.13)$$

$$M_4 = \frac{\sqrt{3}}{2} [M(\theta + \rho) - M(\theta - \rho)]; \quad (2.14)$$

где $L_1 = L_\sigma + \frac{3}{2}L$; L – собственная индуктивность обмотки статора (ротора); $L_\sigma = L_{\sigma\sigma} = L_\sigma$ – индуктивности рассеяния статора и ротора (в предположении об их тождестве); $\rho = 2\pi/3$ – взаимоиндуктивность между фазами статора и ротора в функции угла поворота ротора.

Учитывая в выражении для определения \bar{F}_{AD} обратную матрицу индуктивности $\bar{M}^{-1}(\theta)$, получим

$$\bar{F}_{\text{АД}} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & -b_4 & b_3 & 0 & 0 \\ b_5 & -b_6 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ b_6 & b_5 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

где

$$b_i = \begin{cases} -R_x \frac{L_1}{M_{10}}, i = 1, 2; \\ R_x \frac{M_j}{M_{10}}, i = 3 \div 6, \end{cases} \quad (2.16)$$

причем R_x и M_j определяются из таблицы 2.

Таблица 2.1 – Значения величин R_x и M_j для выражения (4)

$i =$	1	2	3	4	5	6
$R_x =$	R_s	R_r	R_s	R_s	R_r	R_r
$M_j =$	-	-	M_3	M_4	M_3	M_4

Мгновенные значения токов фаз подключенной обмотки статора и ротора рассчитываются с использованием соотношения

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \bar{M}^{-1}(\theta) \cdot \bar{\psi}_{\text{АД}} \quad (2.17)$$

где $\bar{I}_{\alpha\beta} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ i_{r\alpha} \ i_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$ – вектор проекций токов двигателя.

Для вычисленных таким образом значений токов определяются распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя для каждого момента времени. Рассмотрим случай размещения в пазах статора двигателя АДВК-355LA12/4 второй однослойно концентрической обмотки (W_2) при $2p=6$, $m=3$, $z=36$, $q=2$, $a=1$, $W_{c2}=40$, которая отключена от источника питания. С учетом схемы отключенной обмотки статора W_2 рассчитывается ЭДС проводников каждого паза:

$$e_{\text{наз.}}(t) = W \cdot B(t) \cdot L \cdot R \cdot \omega, \quad (2.18)$$

где W – количество проводников в пазу; B – индукция поля, соответствующая положению пазу; L – активная длина проводника; R – радиус вращения проводника; ω – круговая скорость относительного вращения поля и проводника.

Структурная схема компьютерной модели, соответствующей обоснованной математической модели приведена в приложении А.

Определенные таким образом ЭДС пазовых проводников суммируются (с учетом схемы соединения обмотки), в результате чего может быть получена ЭДС e_2 , индуцируемая в каждой фазе отключенной обмотки W_2 . Для двигателя АДВК-355LA12/4 ($U=660$ В), статор которого оборудован дополнительной обмоткой, график мгновенных значений такой ЭДС приведен на рисунке 2.14.

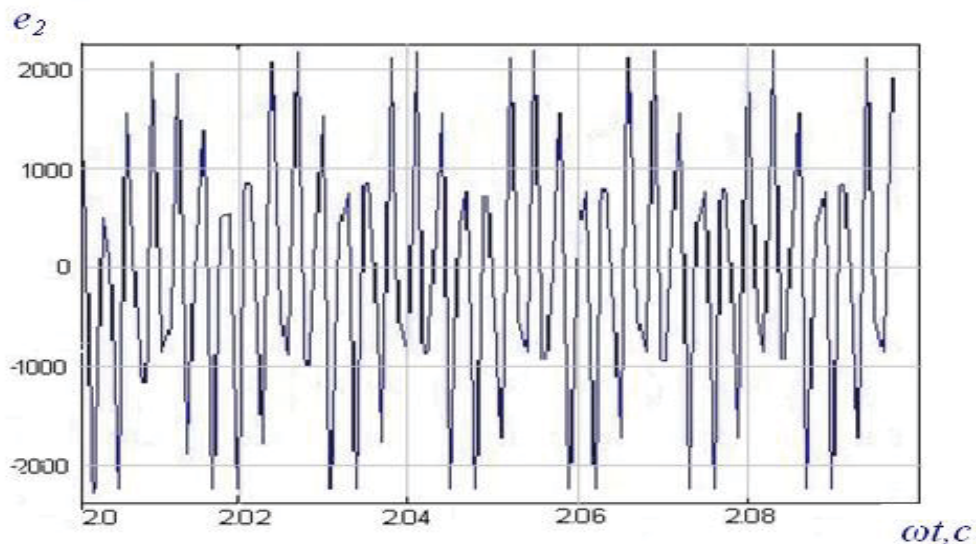


Рисунок 2.14 - Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке W_2 фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355LA12/4

Состояние цепи однофазной утечки тока на землю исследуется по схеме замещения, приведенной на Рисунок 2.15, где R_s - сопротивление кожи; R_b – сопротивление тела человека; R_g – сопротивление обуви; C_s – емкость кожи человека [79, 80, 82, 83]

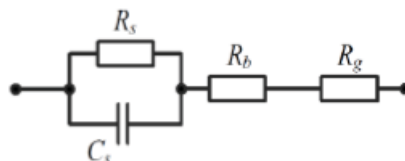


Рисунок 2.15 - Уточненная схема замещения тела человека

Количество электричества через сопротивление цепи однофазной утечки тока на землю за интервал времени $[t', t'']$, вычисляется согласно зависимости:

$$q = \int_{t'}^{t''} I(t) dt. \quad (2.19)$$

где $I(t)$ - среднее квадратическое значение тока утечки за период T основной гармоники.

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt} \quad (2.20)$$

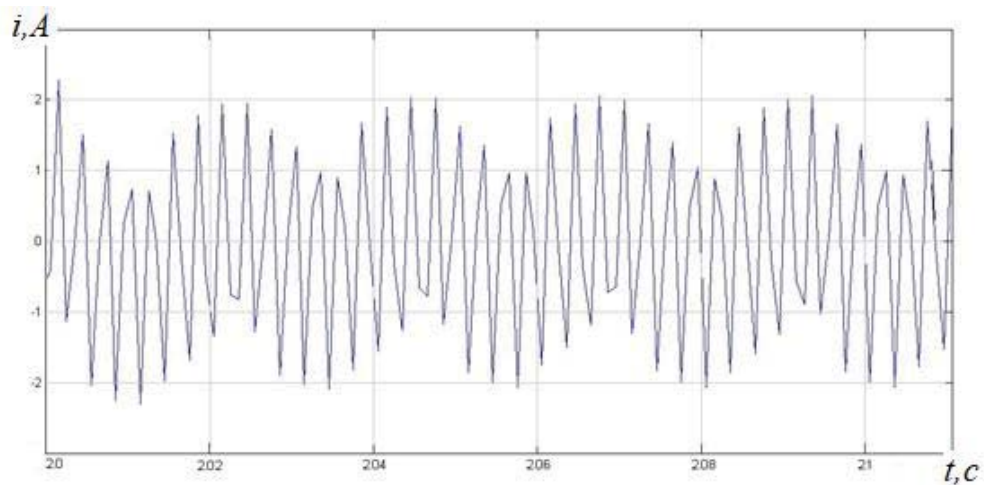


Рисунок 2.16 - Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки (W2) двухскоростного АД

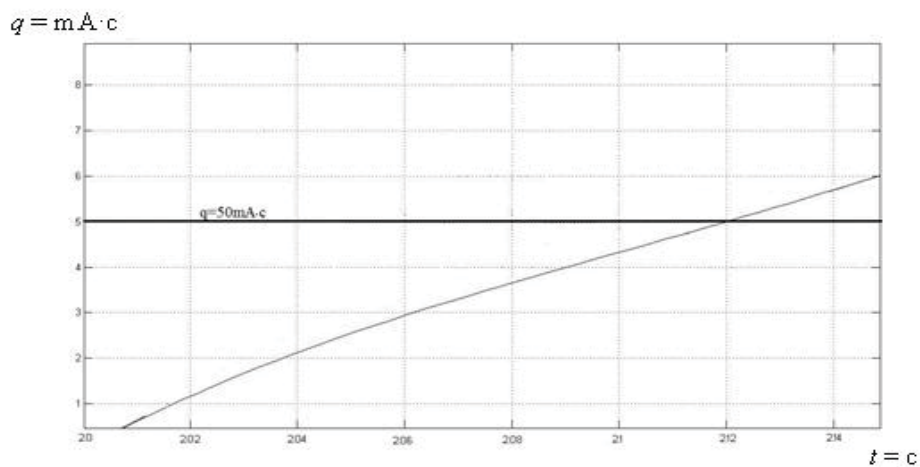


Рисунок 2.17 - Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю, $R_{\text{ут}}=1$ кОм, при касании к отключенной от сети обмотке W2 АД типа АДВК-355L12/4, по рисунку 2.13

В то же время, ЭДС, индуцируемая в отключенной от сети обмотке W_2 статора двухскоростного АД, может быть рассмотрена как фактор формирования возмущающего воздействия относительно ЭДС, индуцируемой в рабочей обмотке W_1 статора АД в режиме выбега. Для исследования процесса применима описанная выше методика при условии корректировки начальных условий применительно к процессу выбега двухскоростного АД, а именно:

- рабочая обмотка W_1 статора, будучи отключенной от сети, из генерирующего объекта переходит в состояние пассивного, в ней индуцируется ЭДС e_1 вращающимся полем токов ротора, снижающаяся по амплитуде и частоте экспоненциально;

- ротор сохраняет активное (генерирующее) состояние в течение экспоненты, определяемой постоянной времени АД (отношением обобщенной индуктивности обмоток и цепей намагничивания к обобщенному сопротивлению);

- при закорачивании отключенной от сети второй обмотки W_2 статора в ней возникает цепь тока на временном интервале генерации ЭДС со стороны ротора, и в этом случае данная обмотка выполняет также генерирующую функцию в отношении ранее включенной рабочей обмотки статора;

- начальным состоянием отключенной от сети обмотки W_2 статора двухскоростного АД следует считать генерацию в ней рассчитанной выше ЭДС e_2 (Рисунок 2.16).

Применительно к обмотке пониженной скорости (W_2) двигателя АДВК-355L12/4 на основании анализа диаграмм (Рисунок 2.14, Рисунок 2.16) делаем вывод о превалировании в ЭДС e_2 частот 50 Гц и 720 Гц. Полагаем, что эта ЭДС и является начальной в рассматриваемой обмотке W_2 статора АД для интервала выбега двигателя (после отключения напряжения питания с рабочей обмотки).

В этом случае, рассматривая генерирующую функцию данной обмотки после ее закорачивания, может быть введено допущение о наличии в ней трех источников ЭДС, соединенных последовательно: ЭДС частот 50 Гц (источники $V_1...V_3$); 720 Гц (источники $V_4...V_6$); и экспоненты (источники $V_7...V_9$),

определяемой постоянной времени двигателя (Рисунок 2.18). Форма фазной ЭДС этой обмотки (до закорачивания), полученная в результате моделирования в соответствии с принятой выше методикой, приведена на рисунке 2.19 [82].

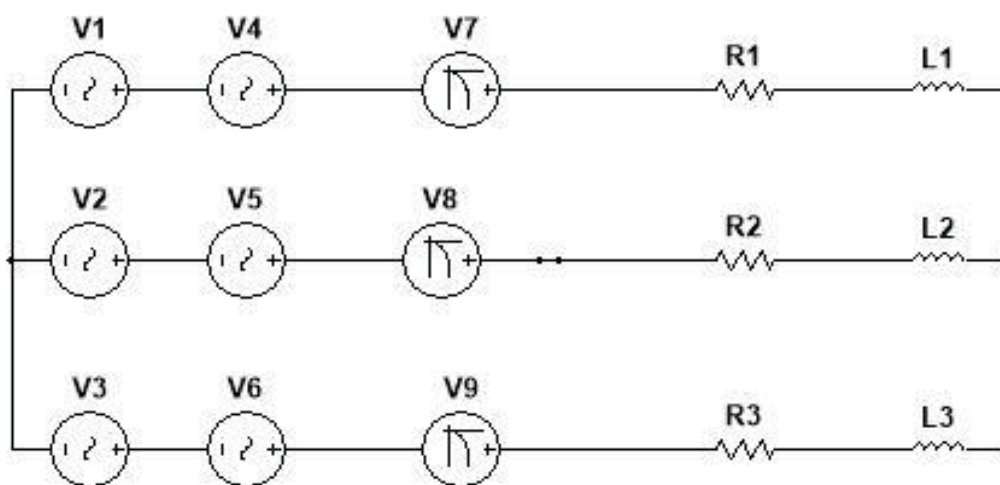


Рисунок 2.18 - Расчётная схема отключенного от сети статора двухскоростного АД (представлен элементами $R1-R3$; $L1-L3$) в режиме выбега при условии его коммутации на цепь к.з. (закорачивании)

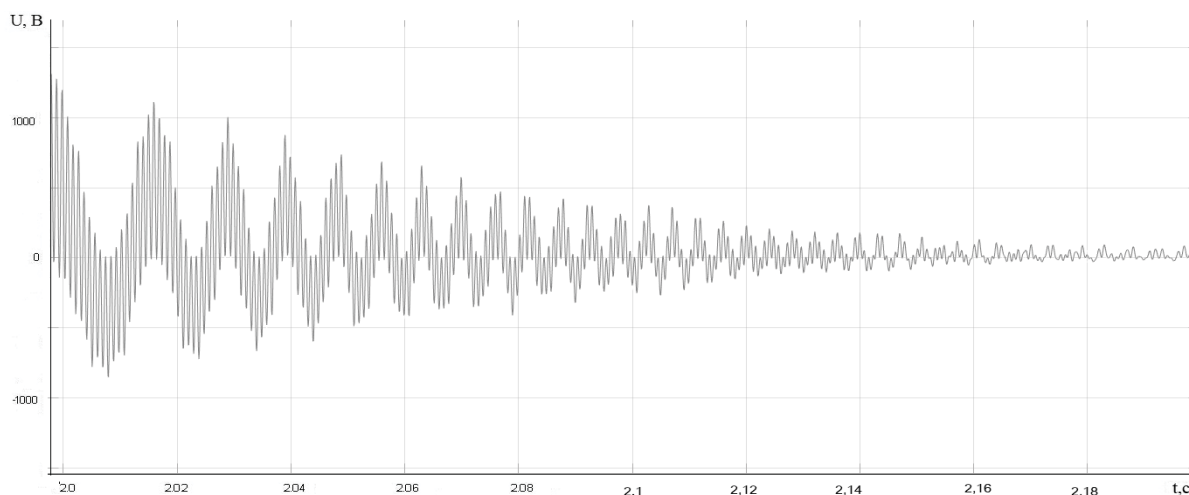


Рисунок 2.19 - Форма фазной ЭДС в отключенной обмотке W2 статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученная в результате моделирования

С учетом этих допущений структуры схемы (Рисунок 2.18) форма ЭДС, генерируемая в разомкнутой ранее отключенной от сети обмотке W2 статора

двухскоростного АД в режиме выбега, представлена на рисунке 2.20, а в случае закорачивания этой обмотки в момент времени t_1 – на рисунке 2.21.

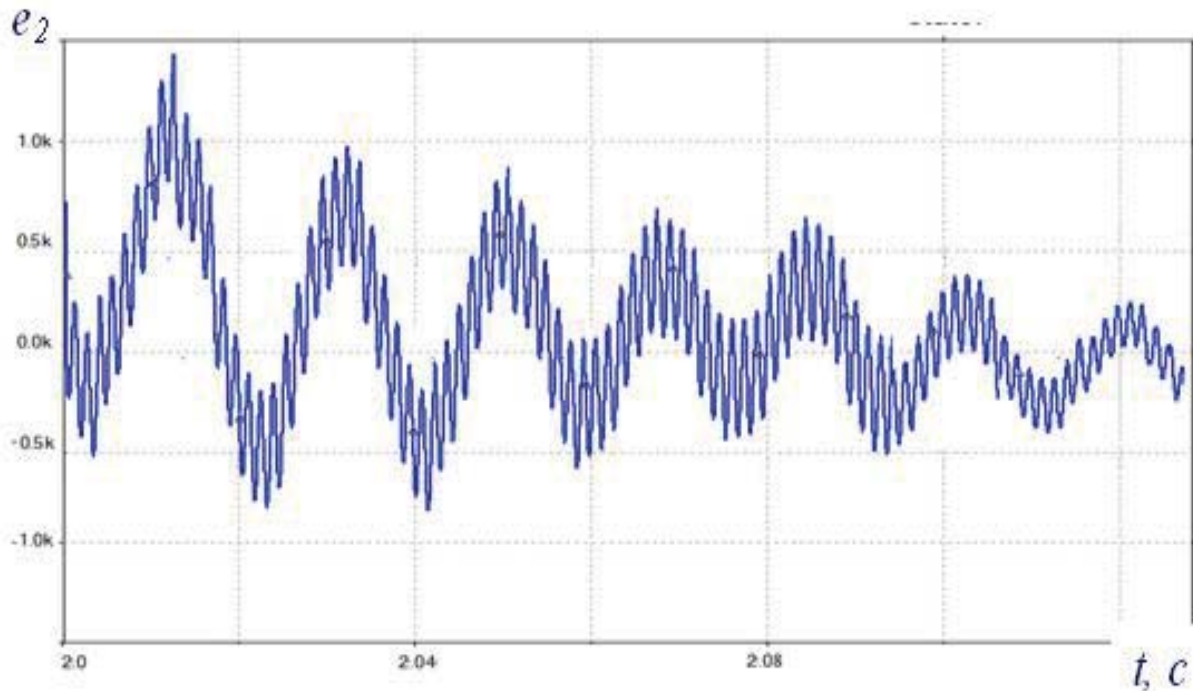


Рисунок 2.20 - Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС e_2 отключенной обмотки W_2 статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы (Рисунок 2.18)

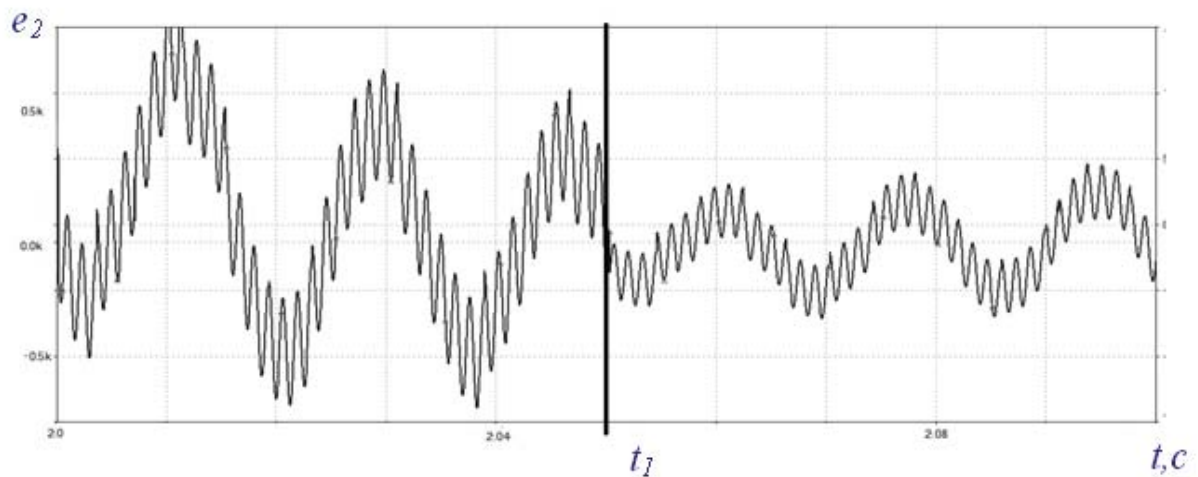


Рисунок 2.21 - Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС e_2 отключенной обмотки W_2 статора двухскоростного АД в режиме выбега, иллюстрирующий процесс закорачивания обмотки статора в момент времени t_1 , полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы (Рисунок 2.18)

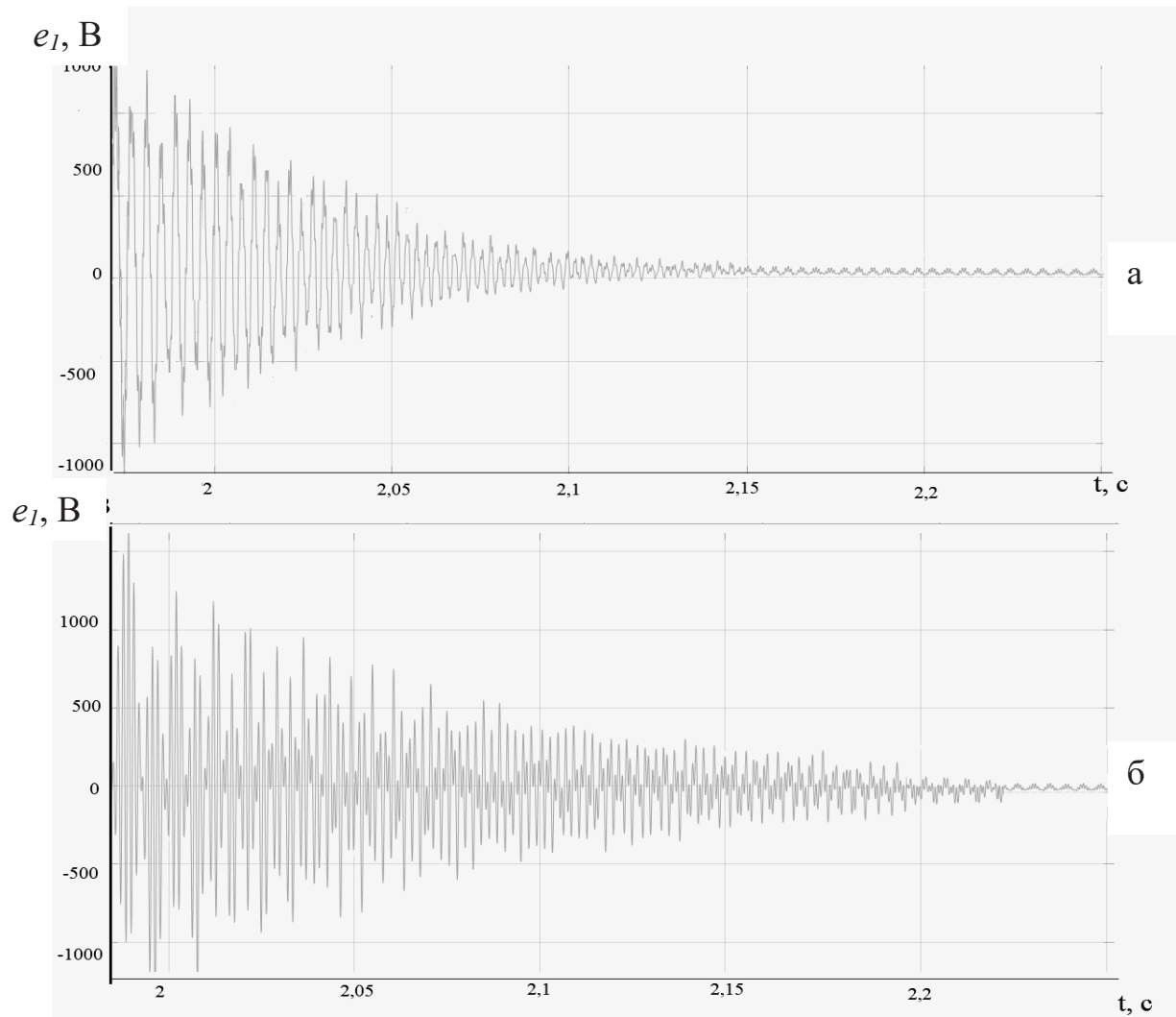


Рисунок 2.22 - Диаграммы величин формирования обратных ЭДС в обмотке $W1$ статора двухскоростного АД: *а* – с учетом замыкания цепи обмотки $W2$ статора; *б* – без учета замыкания цепи обмотки $W2$ статора

Учитывая генерирующую функцию отключенной обмотки $W2$ двухскоростного АД в режиме выбега, начиная с момента ее закорачивания, рассчитанную величину тока в этой обмотке и генерирующую функцию ротора, на основании методики [58, 62] может быть получена кривая фазной ЭДС, индуцируемой в рабочей обмотке $W1$ статора двухскоростного АД (Рисунок 2.22). Сопоставляя формы ЭДС при наличии (см. Рисунок 2.22,а) и отсутствии (Рисунок 2.22,б) возмущающего действия со стороны обмотки $W2$, можно сделать вывод о наличии эффекта ограничения продолжительности формирования ЭДС в обмотке $W1$.

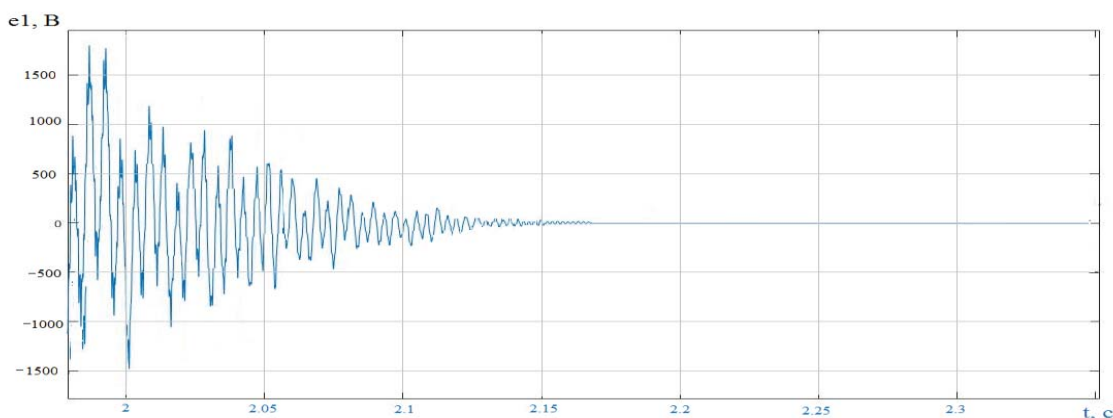


Рисунок 2.23 - Диаграммы величин формирования обратной ЭДС в обмотке W2 статора двухскоростного АД с учетом замыкания цепи обмотки W1

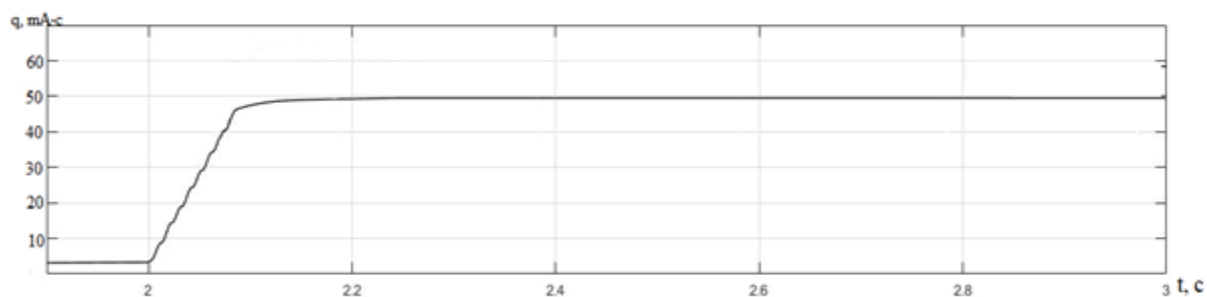


Рисунок 2.24 - Диаграмма величины накопления количества электричества q через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) между рабочей обмоткой W1 статора двухскоростного АД и контуром «земля» при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки W2 статора этого же двигателя в режиме выбега

Применительно к проблематике электробезопасности это создает эффект ограничения количества электричества q в цепи утечки тока на землю (при касании человеком токоведущих элементов обмотки W1) на временном интервале выбега двухскоростного АД, в т.ч. на безопасном уровне ($q \leq 50$ мА·с, Рисунок 2.24). свойственная процессу некоторая инерционность интерпретируется отсутствием мгновенного снижения до нуля величины ЭДС в обмотке W1. Однако общий положительный результат позволяет сделать вывод о принципиальной возможности применения закорачивания отключенной обмотки статора двухскоростного АД на интервале выбега в качестве приемлемого способа подавления его энергетического потока.

2.3 Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ интенсивного подавления амплитудно-частотных параметров обратной ЭДС

Поскольку обратная ЭДС статора АД находится в функциональной зависимости от угловой скорости ротора, достаточное быстрое действие ее подавления может быть достигнуто применением эффективных средств торможения АД [54]:

$$u_{вр} = \frac{L_m}{L_p} j(1-s)\omega_o \psi_{ор} e^{\frac{-t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-s)t}, \quad (2.21)$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и ω_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора; t – время; T_p – постоянная затухания свободного тока ротора; $\psi_{ор}$ – потокосцепление обмотки ротора.

Постоянная времени снижения тока ротора:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_n}{I_0 r_p \omega_0}, \quad (2.22)$$

где r_p – активное сопротивление обмотки ротора; U_ϕ – фазное напряжение обмотки статора АД в режиме холостого хода; L_p – полная индуктивность ротора; ω_0 – синхронная частота вращения ротора; $K_n \approx 1,1$ – коэффициент насыщения магнитной системы АД; I_0 – ток холостого хода АД.

Учитывая сопоставимые продолжительности индукционно-динамического торможения АД и отключения сети, данный процесс может быть применён в комплексе технических решений по защитному обесточиванию ЭТК участка шахты.

В связи с этим, практический интерес представляет анализ процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте применения для подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя.

Важными составляющими процесса, существенно влияющими на величину обратного энергетического потока являются:

- создание импульсов тока короткого замыкания через шунтирующий тиристор (VS2, Рисунок 2.25) включенный между фазами со стороны статора двигателя;

- эффект интенсивного замедления ротора, что в свою очередь приводит к существенному сокращению продолжительности обратной ЭДС двигателя.

Процесс индукционно-динамического торможения обеспечивается силовой схемой в цепи статора АД (Рисунок 2.27) и предполагает чередование состояний динамического (ДТ), индукционного (ИТ) и индукционно-динамического (ИДТ) торможения двигателя [84].

Ток динамического торможения создается посредством подачи на статор через тиристор VS1 полуволн линейного напряжения U_{AB} сети (Рисунок 2.26). Эффект индукционного торможения создается при замыкании через тиристор VS2 ЭДС вращения ($U_{вр}$) ротора АД.

Важным аспектом следует считать, что полуволны тока индукционного торможения создаются за счет замыкания соответствующих полуволн ЭДС вращения $U_{вр}$ через открытый тиристор VS2, т. е. создаются импульсы тормозного тока значительной амплитуды (I_m ит) (Рисунок 2.26). Этим обусловлено возникновение импульсов значительного по величине тормозного момента M_T , который, как известно, пропорционален квадрату тормозного тока I_T [84]:

$$M_T = \frac{n_\phi I_T^2 r_p}{w_0 S_n}, \quad (2.23)$$

где n_ϕ – число фаз присоединения; S_n – скольжение АД в начале интервала торможения.

Создаётся эффект ускоренной остановки ротора, а, следовательно, подавления ЭДС вращения АД. Общая интенсивность замедления ротора АД регулируется величиной углов отпираания тиристорov VS1 и VS2.

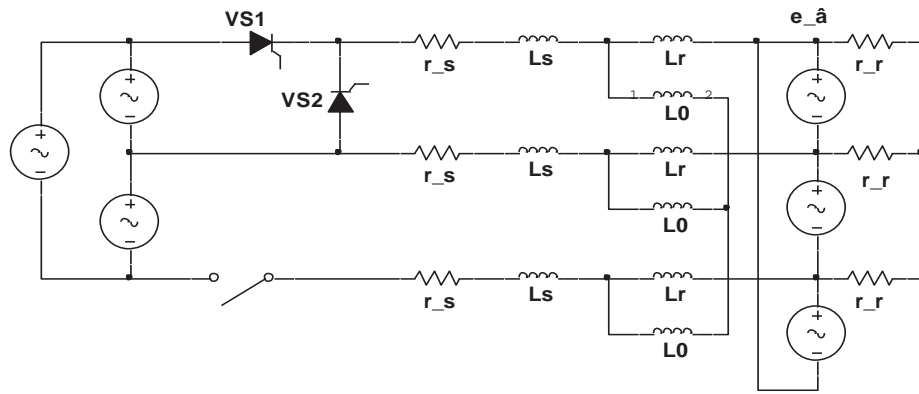


Рисунок 2.25 – Схема для исследования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя [85]

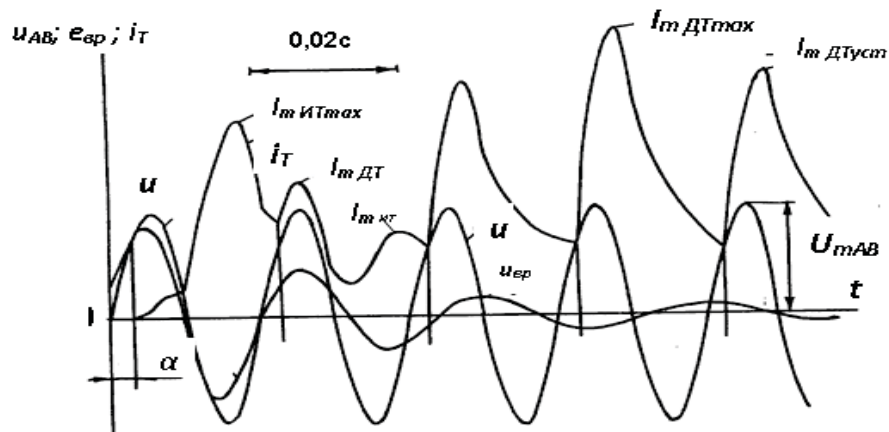


Рисунок 2.26 - Диаграммы формирования тока статора асинхронного двигателя в процессе его индукционно-динамического торможения: α – угол отпирания тиристора VS1

Исследование данного объекта на базе компьютерной модели предполагает определение величин электропоражающего фактора в сети после её защитного отключения (с учетом возможности применения кабеля отходящего присоединения различного сечения и протяженности) [86, 87].

При моделировании принимаем следующие допущения: в сети действует трехфазная система напряжения промышленной частоты; аварийный (опасный) режим возникает в середине кабеля подключения к АД; защитное отключение напряжения питания выполняется групповым автоматическим выключателем не позднее, чем через 0.2 с после возникновения аварийного (опасного) состояния;

в качестве причины защитного отключения принимается возникновение цепи утечки тока на землю сопротивлением 1 кОм (что соответствует сопротивлению тела человека в соответствии с ГОСТ 22929-78 [57]), а также режим двухфазного короткого замыкания; номинальное линейное напряжение сети 1140 В; частота 50 Гц; асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт, сечение силовых жил кабеля варьируется от 25 мм² до 95 мм², тип питающей подстанции КТПВ-1000 [29]. Структурная схема модели фрагмента ЭТК представлена на рисунке 2.27.

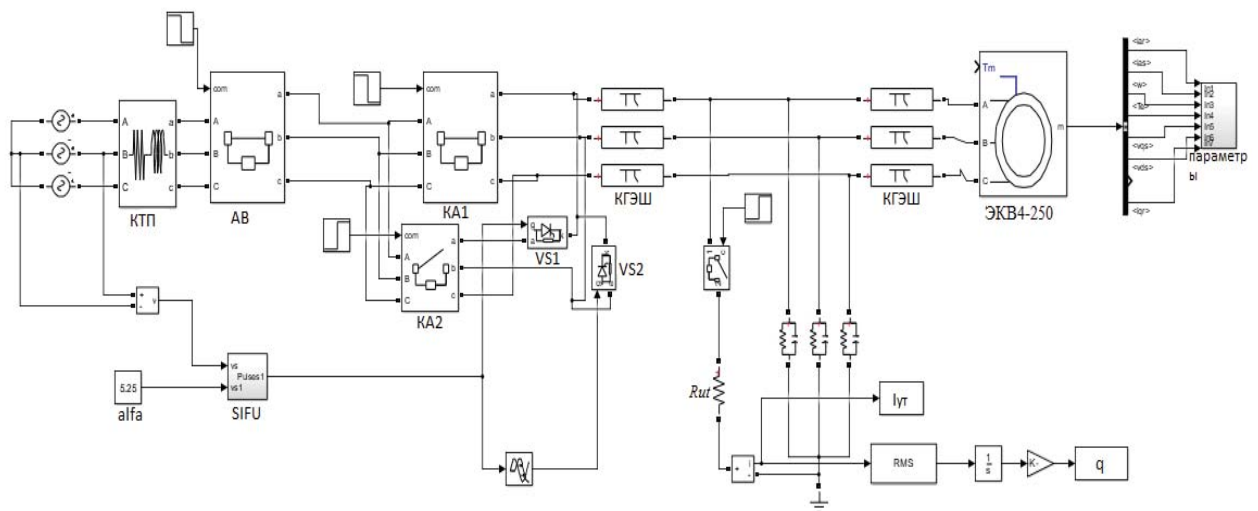


Рисунок 2.27 - Структурная схема модели фрагмента ЭТК

Модель фрагмента ЭТК содержит: *SIFU* – система импульсно-фазового управления тиристорами *VS1*, *VS2*; *KA1*, *KA2* – коммутационные аппараты; *AB* – автоматический выключатель; *Rut* – возникновение утечки тока на землю (1 кОм); асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, ТП – комплектная трансформаторная подстанция. Процесс ИДТ АД начинается в момент возникновения аварийного (опасного) состояния электросети, т.е., до защитного отключения энергетического потока со стороны участковой трансформаторной подстанции и сопровождается предварительным обесточиванием элементов статора АД, находящимся в присоединении с шунтирующим тиристором.

Результаты моделирования процессов в электротехническом комплексе при возникновении цепи утечки тока на землю представлены на рисунке 2.28 – рисунке 2.32.

Анализ полученных диаграмм тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки без воздействия на электромагнитные параметры АД (без учета компенсации емкостной составляющей тока утечки) позволяет сделать вывод о превышении величиной количества электричества через человека нормированного уровня по критерию электробезопасности ($50 \text{ mA}\cdot\text{c}$) [57], даже после защитного отключения сети (момент t_2). Наличие обратных ЭДС АД потребителей, переходящих в режим выбега после отключения сети, подтверждает предположение о формировании эффекта поддержания опасного состояния электросети участка, а параметры энергетического потока достигают уровня представляющего: опасность электропоражения (при возникновении цепи утечки тока на землю).

Исследованием компьютерной модели (Рисунок 2.27) подтверждён положительный эффект процесса ИДТ АД в контексте устранения опасных факторов участковой шахтной электросети после её защитного отключения ($q > 50 \text{ mA}\cdot\text{c}$). В качестве примера служит диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 (Рисунок 2.28) в режиме ИДТ, полученная в компьютерной модели (Рисунок 2.27), которая соответствует расчетным диаграммам (Рисунок 2.25), что позволяет сделать вывод об адекватности модели исследуемому процессу.

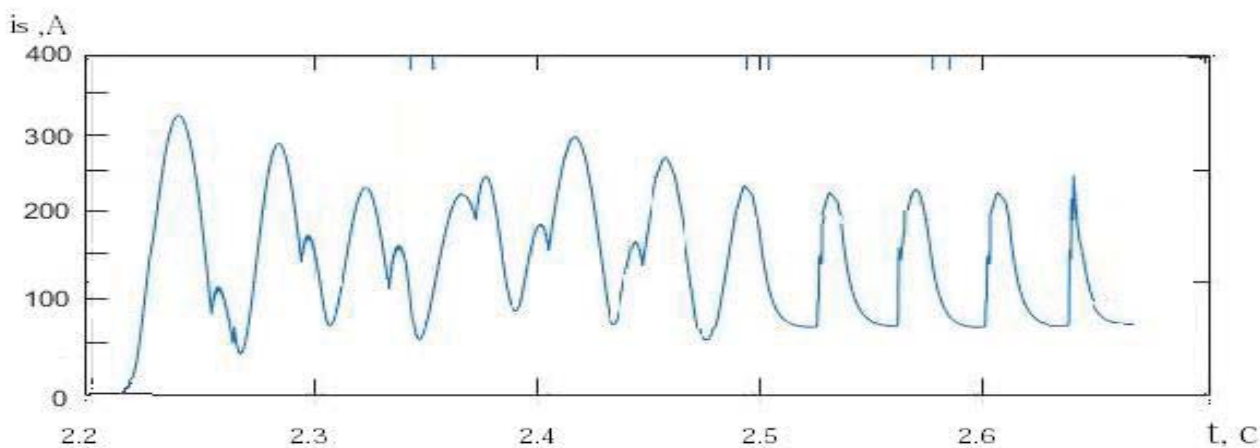


Рисунок 2.28 - Диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 при ИДТ

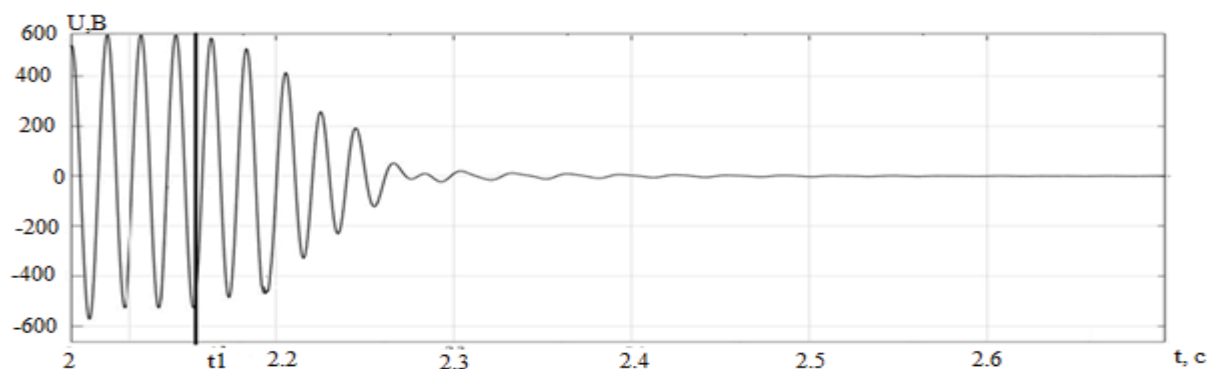


Рисунок 2.29 - Диаграмма напряжения статора АД типа ЭКВ 4-250 (мощностью 250 кВт) на интервале перехода из двигательного режима в режим ИДТ

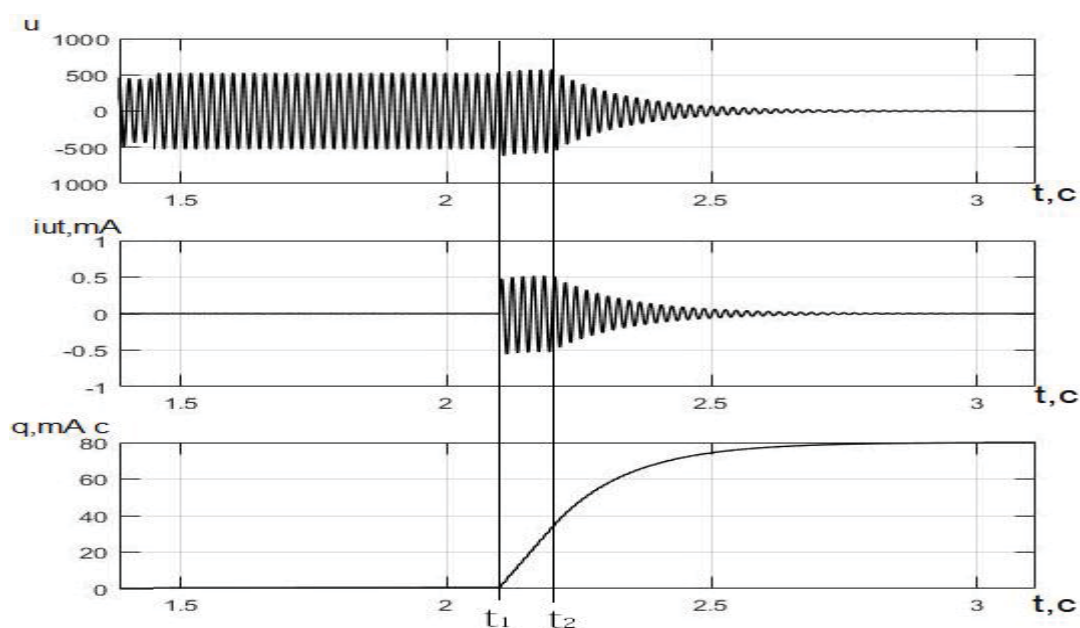


Рисунок 2.30 - Диаграммы величин а) выбега, б) утечки тока на землю, в) количества электричества при отсутствии воздействия со стороны ИДТ [88]

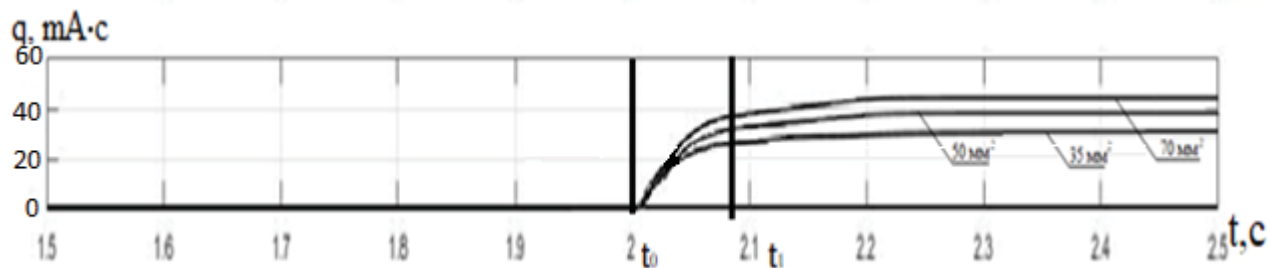


Рисунок 2.31 - Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) для кабелей марки КГЭШ сечением 35мм^2 , 50мм^2 и 70мм^2 при величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha = 60$ эл. град. по схеме (Рисунок 2.25)

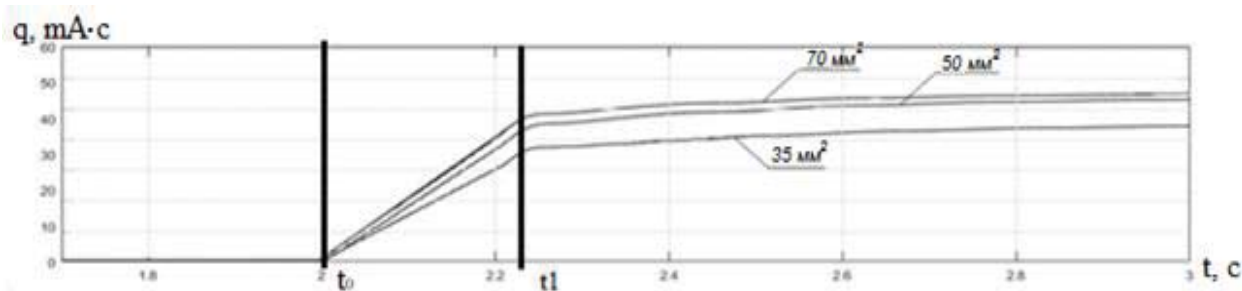


Рисунок 2.32 - Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ сечением $3 \times 35 \text{ мм}^2$, $3 \times 50 \text{ мм}^2$ и $3 \times 70 \text{ мм}^2$ при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha = 45$ эл. град. по схеме (Рисунок 2.25)

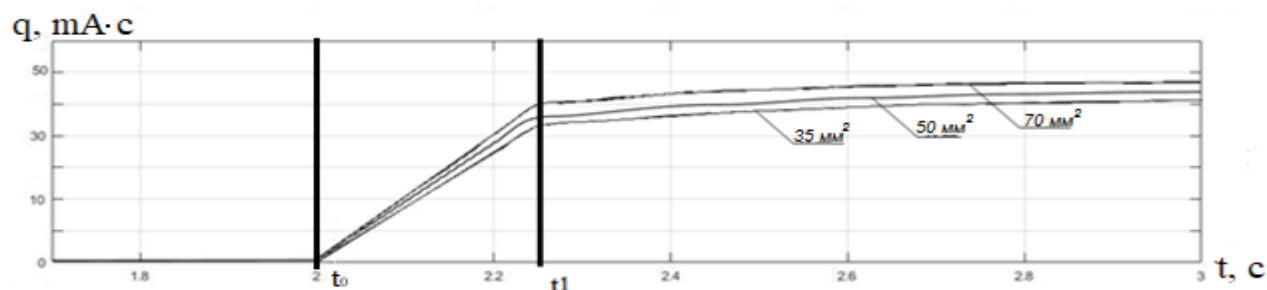


Рисунок 2.33 - Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) применительно к фрагменту электросети с кабелем марки марки КГЭШ сечением $3 \times 35 \text{ мм}^2$, $3 \times 50 \text{ мм}^2$ и $3 \times 70 \text{ мм}^2$ при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha = 30$ эл. град. по схеме (Рисунок 2.25)

Зависимость интенсивности замедления ротора АД, количества электричества в цепи утечки тока на землю от величины угла α отпирания тиристора VS1 (Рисунок 2.25), представлен на рисунке 2.34. Установлено, что в сети линейного напряжения 1140 В при использовании кабеля КГЭШ 3×70 в цепи питания двигателя мощностью 250 кВт электробезопасность состояния после защитного отключения будет поддерживаться при использовании режима ИДТ с углом отпирания тиристора VS1 (Рисунок 2.33) $\alpha \leq 60$ эл.град. При этом угол отпирания тиристора VS2 (Рисунок 2.25) может оставаться равным нулю (эл. град.), а задержка на включение в работу этого тиристора может составлять 7 ± 2 мс. Последнее обстоятельство крайне важно в контексте практической

реализации, поскольку позволяет применять вместо этого тиристора диод, коммутируемый вакуумным однополюсным контактором, например, серии SPVC отечественного производства [89, 90].

Реально, с учётом защитного отключения энергетического потока участковой ТП её силовым коммутационным аппаратом, процесс ИДТ АД начатый в момент возникновения аварийного (опасного) состояния сети будет протекать не в полной мере, т.к. после отключения коммутационного аппарата ТП (спустя $t=0.1$ с с момента аварии) прекратится условие протекания тока через тиристор VS1 (Рисунок 2.25). Тогда процесс будет продолжен индукционным торможением (включенное состояние тиристора VS2 (Рисунок 2.25) с углом отпирания $\alpha=0$ эл.град.).

Уточнённые диаграммы электрических параметров в питающем кабеле в режиме утечки тока на землю представлены на рисунке 2.34 и свидетельствуют о возможности применения индукционно-динамического и последующего индукционного торможения в качестве инструмента прекращения опасного состояния сети участка шахты после её защитного отключения. Результаты показывают реальность применения комбинированных контакторно-полупроводниковых схем реализации режима ИДТ АД в контексте подавления обратной ЭДС двигателя в режиме выбега, что определяется приемлемыми показателями продолжительности коммутационных процессов в контакторных элементах.

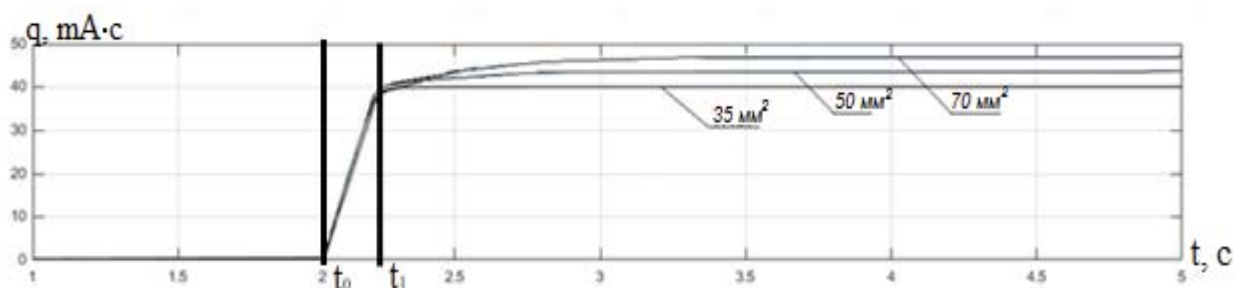


Рисунок 2.34 - Уточненные диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ут} = 1$ кОм) для кабелей марки КГЭШ сечением 3×35 мм², 3×50 мм² и 3×70 мм² с использованием ИДТ, при величине угла отпирания тиристора VS1; $\alpha = 30$ эл. град. (Рисунок 2.25)

2.4 Выводы по разделу 2

1. На основании анализа функциональных возможностей технических средств подавления обратных энергетических потоков АД, генерируемых в электрических сетях после отключения напряжения питания обоснована концепция подавления обратного энергетического потока АД на интервале выбега на основе управления электромагнитными параметрами асинхронной машины путём создания контура короткого замыкания в дополнительной обмотке статора.

2. Разработана математическая модель исследования процесса подавления обратного энергетического потока АД на интервале выбега на основе применения управляющих воздействий относительно электромагнитных параметров электрической машины, отличающаяся способом представления обратной ЭДС асинхронного двигателя структурными элементами многообмоточного трансформатора, коммутируемыми с фиксированной частотой и скважностью, что составило основу экспресс-метода расчета параметров эффективности ограничения обратных энергетических потоков АД в сетях шахтных участковых ЭТК конкретной структуры.

3. Разработана математическая модель процесса формирования ЭДС в отключенной обмотке статора двухскоростного АД, учитывающая взаимное влияние магнитных потоков ротора и рабочей обмотки статора, отличающаяся учётом возмущающих факторов на интервале свободного выбега и позволяющая установить характер изменения и численные значения параметров ЭДС рабочей обмотки статора в зависимости от величины тока отключенной обмотки статора при её закорачивании и определить допустимые параметры кабельных присоединений в цепях статоров двухскоростного асинхронного двигателя, удовлетворяющие критерию безопасности состояний на интервале выбега при условии подавления обратных энергетических потоков АД методом закорачивания его отключенной от сети обмотки статора.

4. Полученными количественными показателями обосновано наличие потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величины ЭДС в отключенной от сети обмотке статора работающего двухскоростного АД.

5. Установлена функциональная взаимосвязь между параметрами управления обратной ЭДС статора двухскоростного АД (в режиме закорачивания второй, отключенной обмотки статора в процессе выбега АД) и электрическими параметрами в месте повреждения кабеля применительно к цепи утечки тока на землю и цепи междуфазного к.з. с учётом длины кабельного присоединения и сечения рабочих жил.

6. Установлена потенциальная возможность ограничения параметров обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки статора двухскоростного АД в режиме выбега посредством замыкания отключенной статорной обмотки этого же двигателя и снижения количества электричества в цепи утечки в присоединении данной обмотки и контура «земля», в т.ч., до безопасной величины и определены количественные показатели кабельных присоединений статоров двухскоростных АД существующих промышленных серий при эксплуатации которых достигаются безопасные параметры электросети на интервале выбега АД при условии подавления обратных энергетических потоков методом закорачивания отключенных обмоток статора.

7. Математическим и компьютерным моделированием исследованы возможности и установлена целесообразность применения метода индукционно-динамического и последующего индукционного торможения асинхронного двигателя потребителя в качестве способа прекращения опасного состояния шахтной участковой электрической сети после защитного отключения утечки тока на землю, либо междуфазного к.з. Доказана возможность применения упрощенной схемы реализации процесса на основе использования диодно-контакторной силовой схемы.

РАЗДЕЛ 3

СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В КОНТЕКСТЕ СООТВЕТСТВИЯ КРИТЕРИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Энергетические параметры ЭТК участка шахты после отключения напряжения питания (со стороны ТП) определяются действием АД потребителей, находящихся в состоянии выбега и характеризуются экспоненциальной функцией снижения амплитуды и частоты их обратных ЭДС, обуславливают величину и продолжительность тока в контурах силовых присоединений после отключения напряжения питания. Это даёт основания применения термина «обратный энергетический поток», как представляющего комплексную взаимосвязь данных параметров.

3.1 Методы подавления обратных энергетических потоков как фактор обеспечения защиты от электропоражения в электроустановках участка шахты

Факторы электротравматизма и функции защиты от электропоражения в сети ЭТК участка шахты иллюстрируются схемой (Рисунок 3.1).

Из анализа схемы формирования электропоражающего фактора в электрической сети участка шахты на примере применения последних разработок в области обеспечения электробезопасности (аппарат АЗУР-4МК) следует, что реакцией защиты на прикосновение человека к фазе сети (R_{ym}) на участке между контактором $KM1$ пускателя и АД ($M1$) потребителя будет отключение автоматического выключателя QF1 участковой ТП одновременно с включением короткозамыкателя 3 фазы, к которой произошло прикосновение, что выявляется блоком ОПФ 4. Заданная персоналом величина составляющей ёмкости изоляции сети компенсируется статическим компенсатором 6. В

соответствии с техническими характеристиками аппарата АЗУР-4МК, эта его собственная защитная функция по продолжительности составляет 0.01 с [61]. Общая продолжительность процесса отключения АВ ($QF1$) достигает 90 мс.

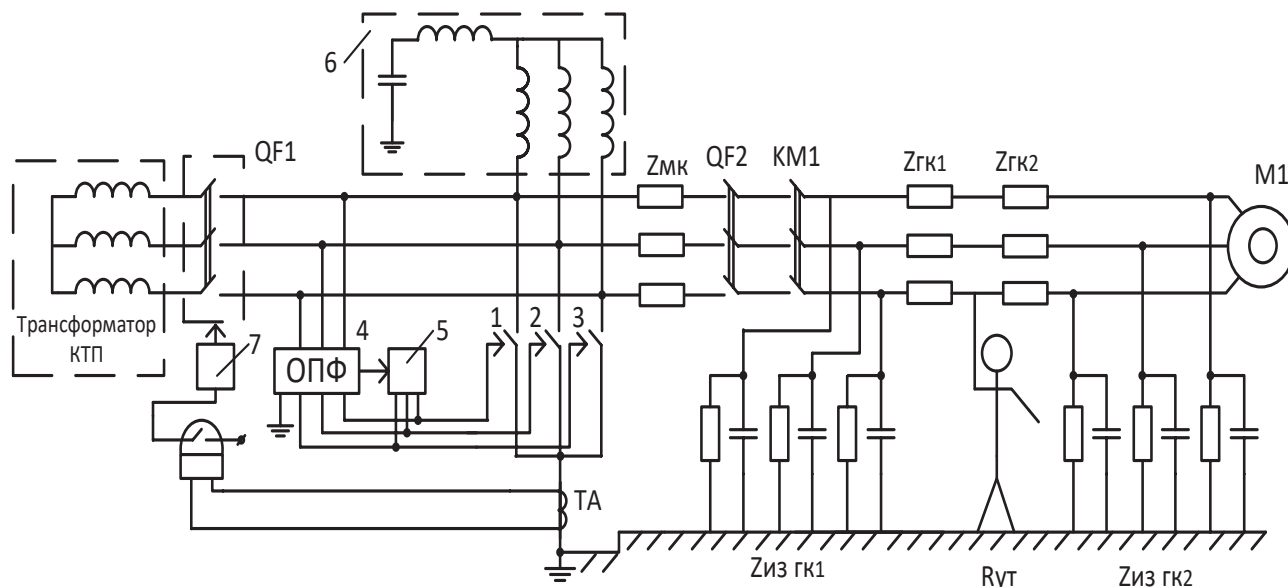


Рисунок 3.1 – Схема формирования электропоражающего фактора в электрической сети ЭТК: 1-3 – фазные короткозамкатели (ФК) ; 4 – блок выявления повреждённой фазы; 5 – блок управления ФК; 6 – компенсатор ёмкости сети; 7 – устройство отключения автоматического выключателя $QF1$

Электропоражающий фактор (количество электричества q в цепи утечки тока на землю) может быть рассчитан в отношении касания человеком с собственным сопротивлением тела $R_{yt} = 1\text{кОм}$ фазы сети между магнитным пускателем и АД для следующих состояний:

- состояние 1 – средства защиты от электропоражения отсутствуют;
- состояние 2 – срабатывает защита от утечек тока на землю с закорачиванием «поврежденной» фазы через 0.01 с от начала процесса и с отключением напряжения сети через 0.1 с от начала процесса. Компенсируется емкость изоляции 0,5 мкФ/фазу. Влиянием обратной ЭДС АД пренебрегаем;

- состояния 3 – срабатывает защита от утечек тока на землю (аналогично предыдущему варианту). После отключения сети учитывается воздействие обратной ЭДС АД мощностью 250 кВт;

- состояние 4 – учитываются все параметры состояния 3. При этом учитывается эффект закорачивания дополнительной обмотки статора АД (с параметрами $X=0,000328$ Гн);

- состояние 5 – учитываются все параметры состояния 3. При этом принимается двухскоростной АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, и в режиме выбега закорачивается обмотка пониженной скорости;

- состояние 6 – учитываются все параметры состояния 3. При этом принимается двухскоростной АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, и в режиме выбега закорачивается обмотка номинальной скорости;

- состояние 7 – учитываются все параметры состояния 3. При этом в момент возникновения утечки тока на землю осуществляется индукционно-динамическое торможение АД типа ЭКВ4-250, номинальной мощности 250 кВт, (угол отпираания тиристора динамического торможения 100 эл. град.); задержка процесса 0.05 с (на коммутацию сети).

Измерения касаются электрической сети напряжений 1140 В при использовании кабелей марки КГЭШ на участке от магнитного пускателя до АД сечений 25 мм²; 35 мм²; 50 мм²; 70 мм² и длин: 100 м; 200 м; 300 м.

Полученные параметры и обобщённые характеристики процесса представлены графиками (Рисунок 3.2 – Рисунок 3.12).

Анализ диаграмм тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление утечки (без учета компенсации ёмкости сети) (Рисунок 3.2) позволяет сделать вывод о превышении уровня количества электричества через человека нормированной величины по критерию электробезопасности ($q=50$ мА•с).

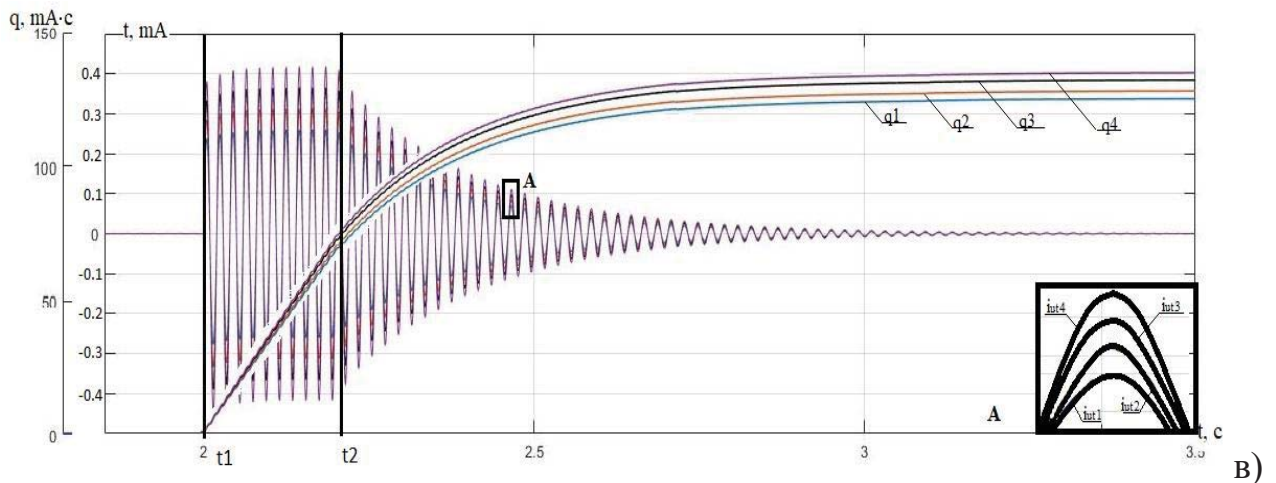
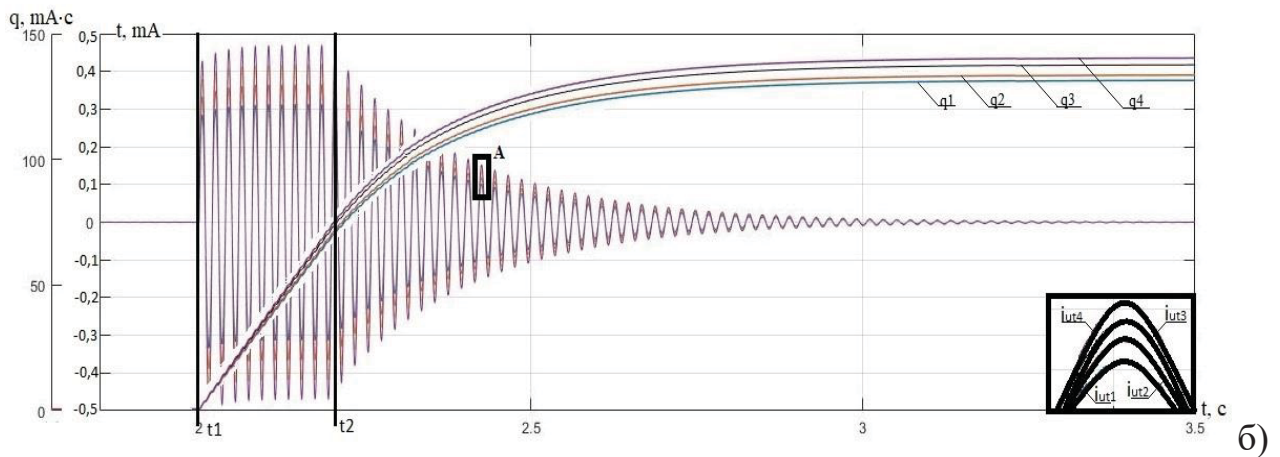
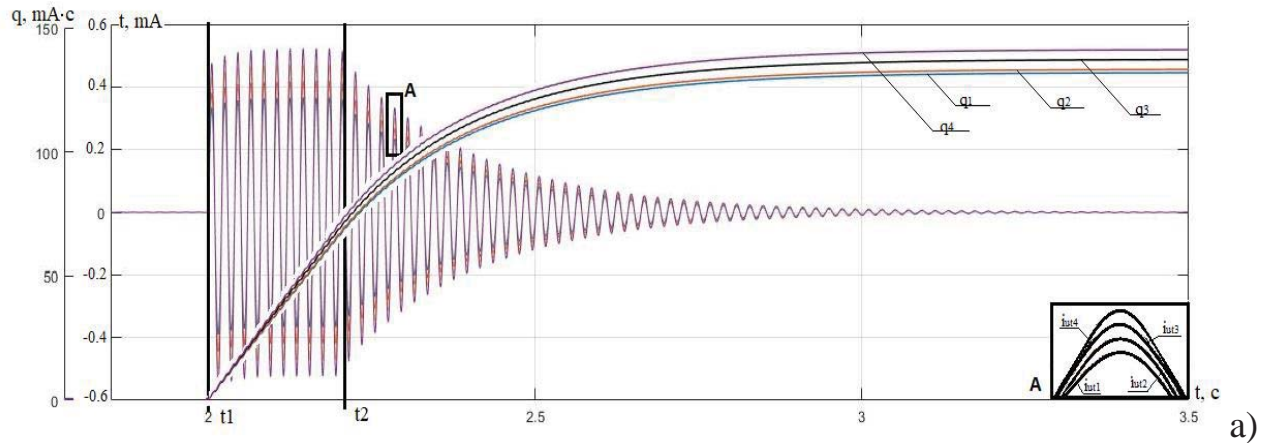


Рисунок 3.2 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4); а) длина кабеля 100 м; б) длина кабеля 200 м; в) длина кабеля 300 м (состояние 1)

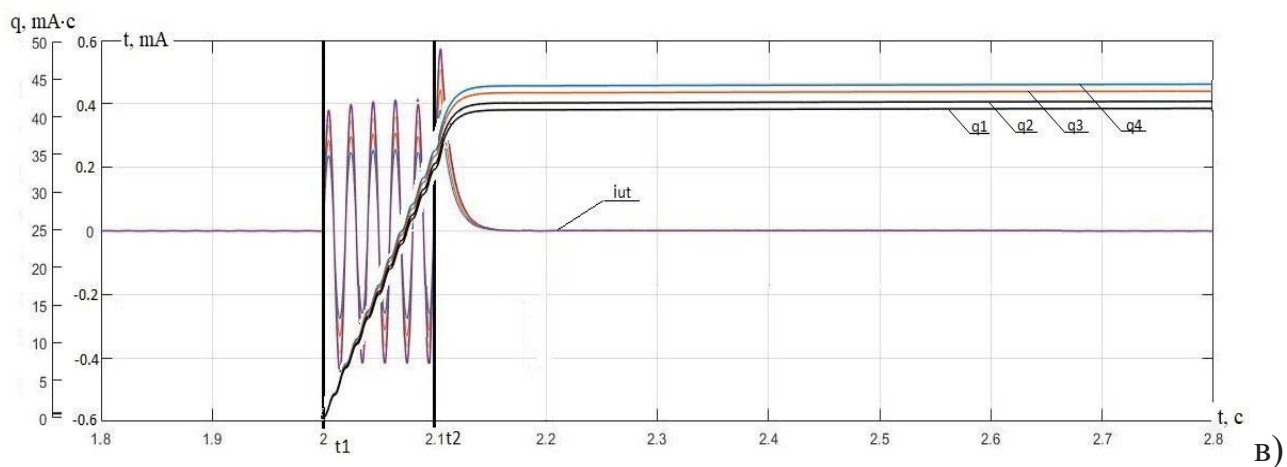
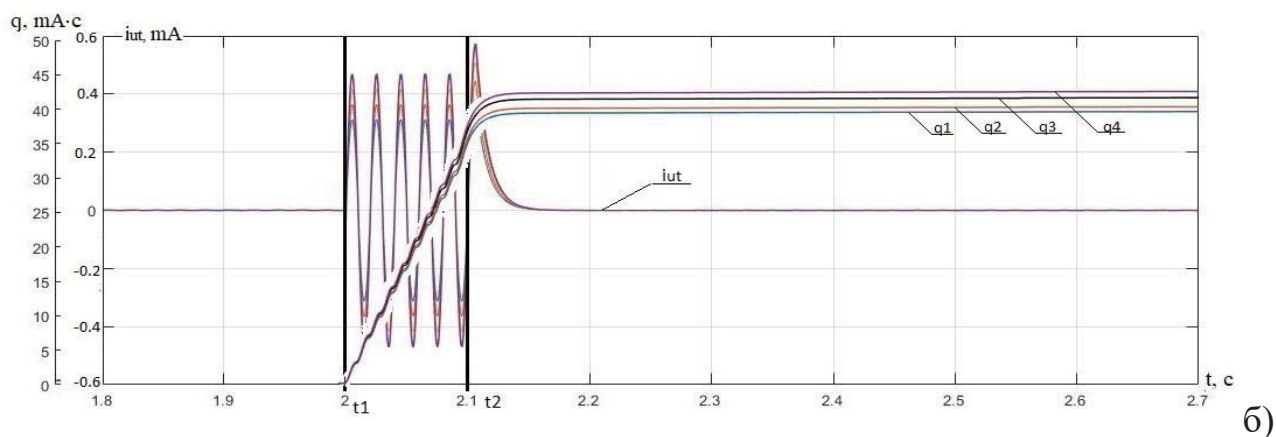
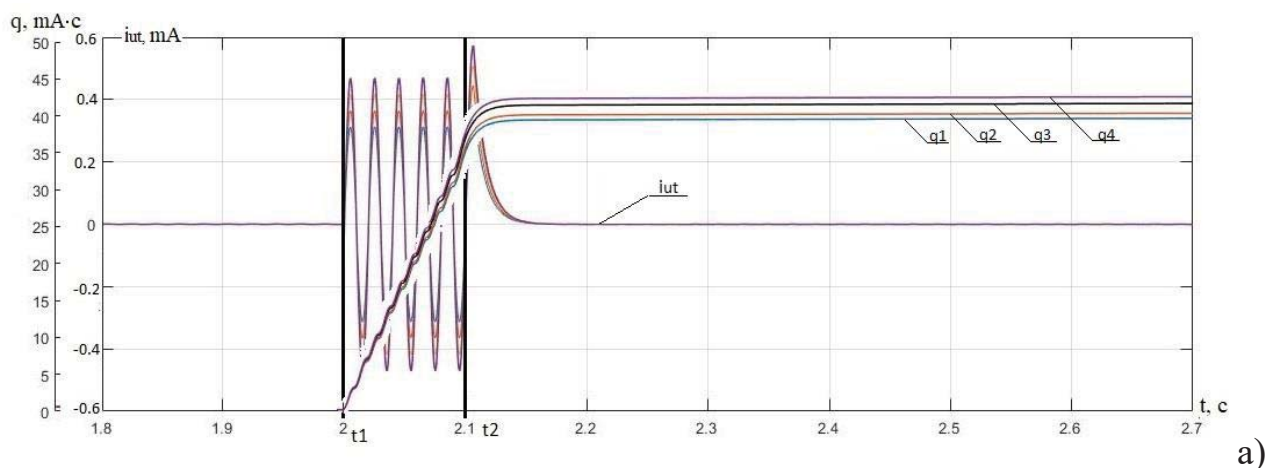


Рисунок 3.3 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4); а) длина кабеля 100 м; б) длина кабеля 200 м; в) длина кабеля 300 м (состояние 2; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю)

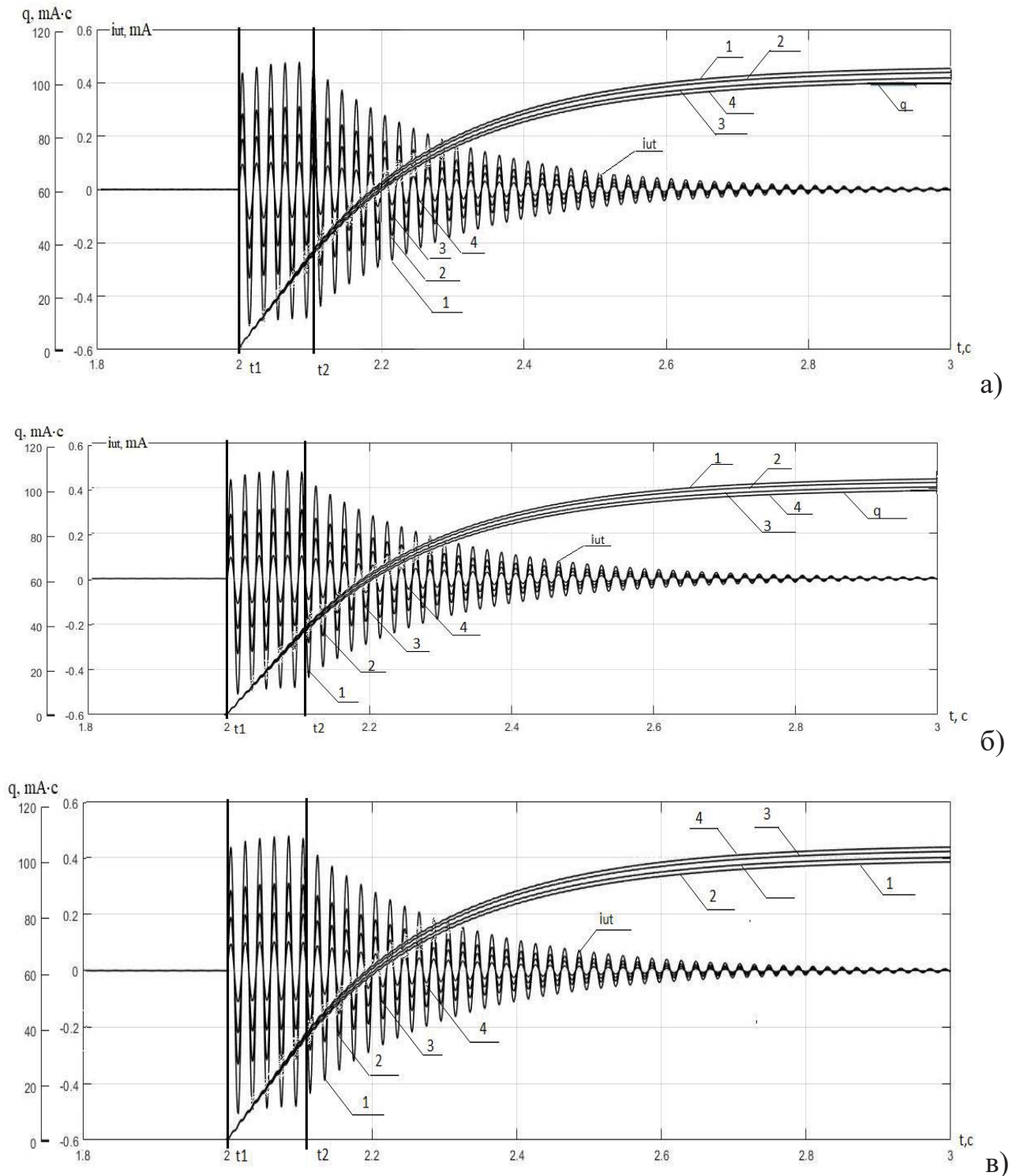


Рисунок 3.4 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4); а) длина кабеля 100 м; б) длина кабеля 200 м; в) длина кабеля 300 м (состояние 3; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю)

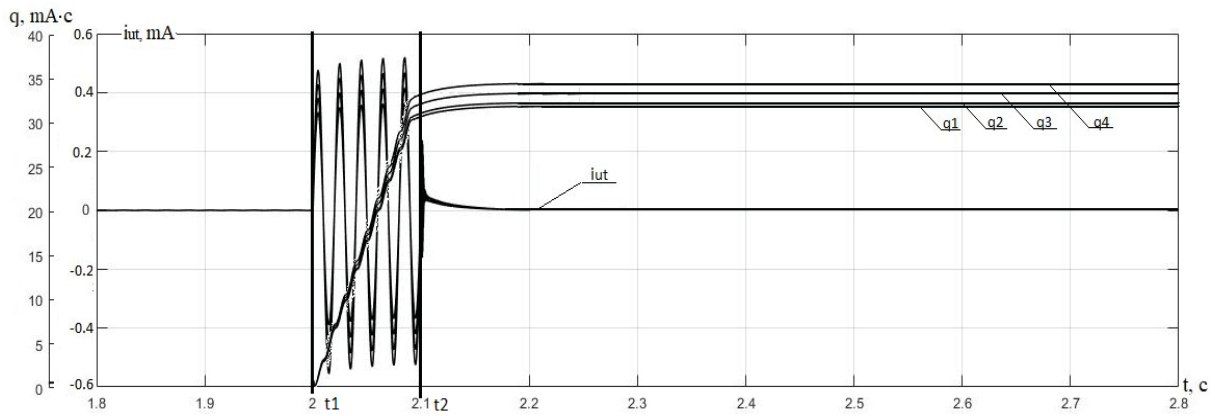


Рисунок 3.5 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) с учётом эффекта от закорачивания дополнительной обмотки статора АД мощностью 250 кВт; длина кабеля 100 м (состояние 4; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю)

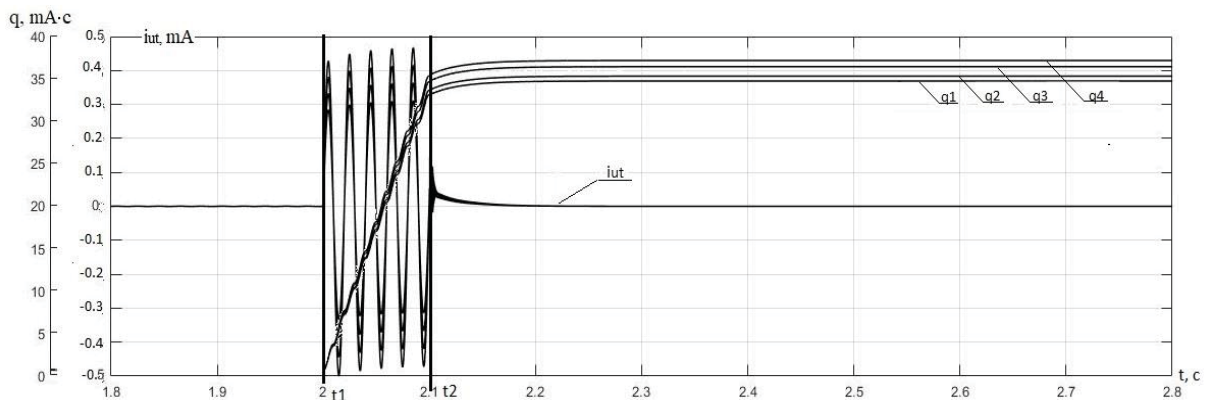


Рисунок 3.6 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) с учётом эффекта от закорачивания дополнительной обмотки статора АД мощностью 250 кВт; длина кабеля 200 м; (состояние 4; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю)

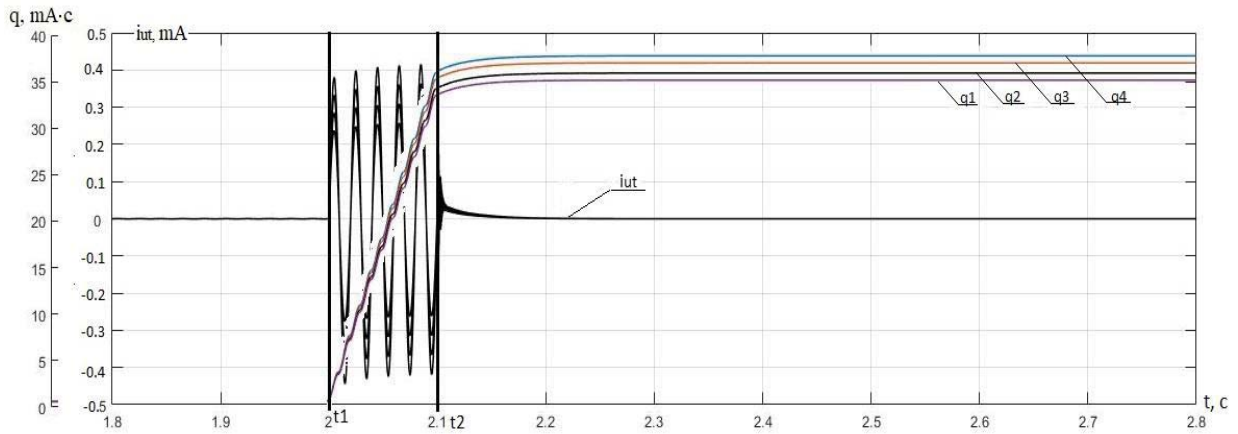


Рисунок 3.7 – Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) с учётом эффекта от закорачивания дополнительной обмотки статора АД мощностью 250 кВт; длина кабеля 300 м (состояние 4; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю)

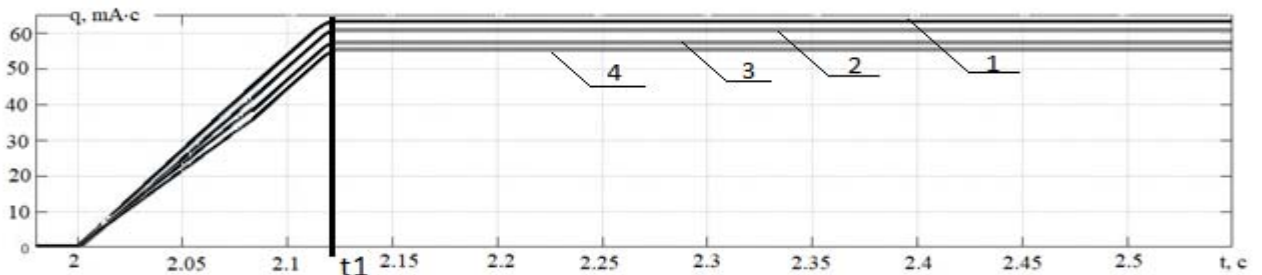


Рисунок 3.8 - Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю при касании человека ($R_{ym} = 1\text{кОм}$) к подключенной к сети обмотке номинальной скорости двухскоростного АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт кВт, при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега (t_1 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю); утечка тока на землю произошла в кабеле для кабелей марки КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) длиной 200 м (состояние 5)

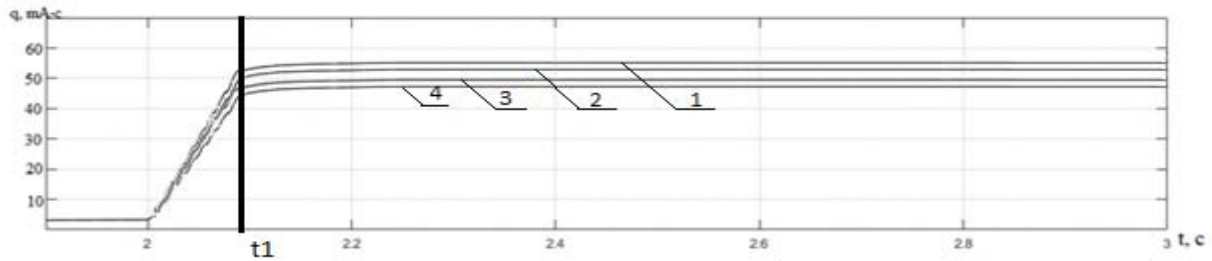


Рисунок 3.9 - Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю при касании человека ($R_{ym} = 1 \text{ кОм}$) к подключенной к сети обмотке пониженной скорости двухскоростного АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега (t_1 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю); утечка тока на землю произошла в кабеле для кабелей марки КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) длиной 200 м (состояние б)

Анализ свойств ограничения электропоражающего фактора в отключенной от сети обмотке статора двухскоростного АД позволяет сделать вывод о функциональной недостаточности данного способа. Так, допустимый параметр электробезопасности ($q=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$) будет превышен в следующих случаях:

- при касании к подключенной к сети обмотке номинальной скорости двухскоростного асинхронного двигателя при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега для всех типов кабелей;

- при касании к подключенной к сети обмотке пониженной скорости двухскоростного асинхронного двигателя при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега для кабелей типа КГЭШ 3x70 мм² и КГЭШ 3x50 мм².

Очевидным фактором усиления эффекта подавления обратной ЭДС АД является совмещение процесса формирования контура повышенного тока в цепи статора с процессом замедления ротора, что соответствует эффекту

индукционно-динамического торможения АД. Диаграммы параметров структуры ЭТК в состоянии индукционно-динамического торможения АД в диапазоне углов отпирания тиристора цепи тока динамического торможения $100 \leq \alpha \leq 135$ (эл. град) приведены на рисунке 3.8-3.10, из которого следует, что способ индукционно-динамического торможения АД позволяет ограничить электропоражающий фактор вне зависимости от сечений и длин кабелей марки КГЭШ, в которых может образоваться цепь утечки ($R_{ym} = 1 \text{ кОм}$) тока на землю.

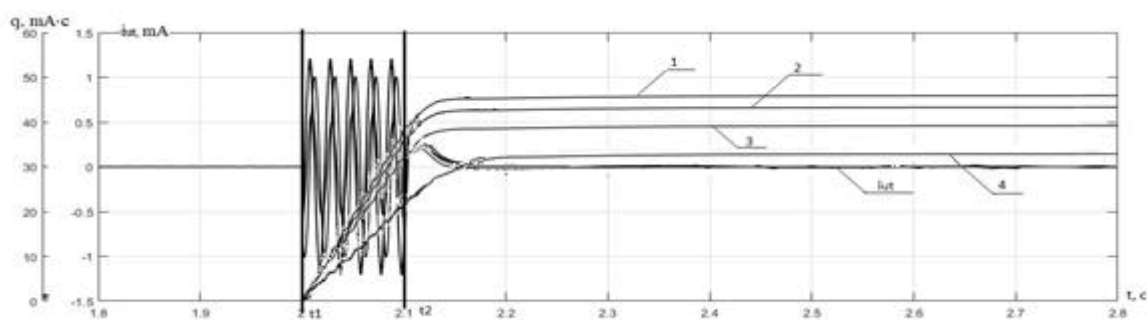


Рисунок 3.10 - Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки ($R_{ym} = 1 \text{ кОм}$) в кабелях марки: КГЭШ $3 \times 70 \text{ мм}^2$ (1); КГЭШ $3 \times 50 \text{ мм}^2$ (2); КГЭШ $3 \times 35 \text{ мм}^2$ (3); КГЭШ $3 \times 25 \text{ мм}^2$ (4) с учётом эффекта ИДТ АД (типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт); длины кабеля 100 м;

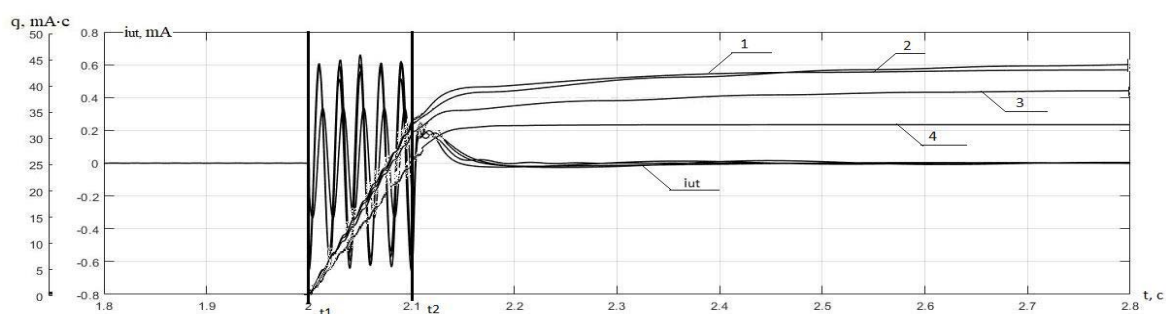


Рисунок 3.11 - Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки ($R_{ym} = 1 \text{ кОм}$) в кабелях марки: КГЭШ $3 \times 70 \text{ мм}^2$ (1); КГЭШ $3 \times 50 \text{ мм}^2$ (2); КГЭШ $3 \times 35 \text{ мм}^2$ (3); КГЭШ $3 \times 25 \text{ мм}^2$ (4) с учётом эффекта ИДТ АД (типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт); длины кабеля 200 м;

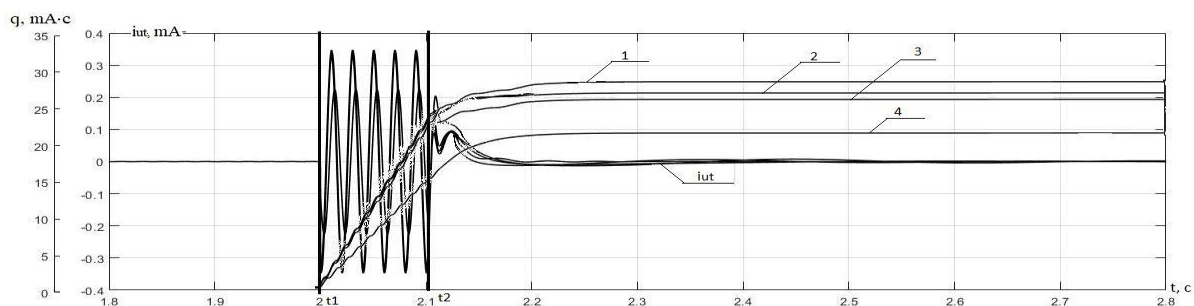


Рисунок 3.12 - Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки ($R_{ym} = 1\text{кОм}$) в кабелях марки: КГЭШ 3x70 мм² (1); КГЭШ 3x50 мм² (2); КГЭШ 3x35 мм² (3); КГЭШ 3x25 мм² (4) с учётом эффекта ИДТ АД (типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт); длины кабеля 300 м;

3.2 Анализ влияния энергетики обратной ЭДС АД на точку короткого замыкания в сети силового присоединения

Междуфазное к.з. в силовом кабеле электропитания АД создаёт все условия для перехода этой электрической машины в режим магнитного торможения [91]. Параметры процесса определяются величиной токов, образованных в замкнутом контуре цепи статора под действием обратной ЭДС, препятствующих вращению потока. Из анализа процесса и экспериментов следует, что пик тормозного момента является квадратичной функцией начальной величины магнитного потока и зависит от коэффициента его затухания (с ростом мощности АД коэффициенты затухания уменьшаются, и относительная величина пиков тормозного момента возрастает). Исследования [92] показывают, что при номинальном напряжении на зажимах АД в момент междуфазного к.з. на вводе его статора пики тормозных моментов составляют 4-5 M_n для шестиполюсных и 6-7 M_n для четырёхполюсных машин (где M_n – номинальный электромагнитный момент АД). Максимум пиков тормозного момента достигается в течение первого полупериода после начала к.з. и вызывает интенсивное снижение угловой скорости АД, которое продолжается в течение 0,02 с ÷ 0,06 с независимо

от мощности и инерционности привода (Рисунок 3.13). При этом, угловая скорость ротора ω_{PT} , при которой прекращается торможение имеет следующую функциональную зависимость от суммарной величины момента инерции J_{Σ} привода

$$\omega_{PT} = \sqrt{\left(\omega_0^2 - \frac{2\Delta W_M}{J_{\Sigma}}\right)} \quad (3.1)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость вращения магнитного потока АД, ΔW_M – кинетическая энергия, поглощаемая при торможении АД конкретного типа.

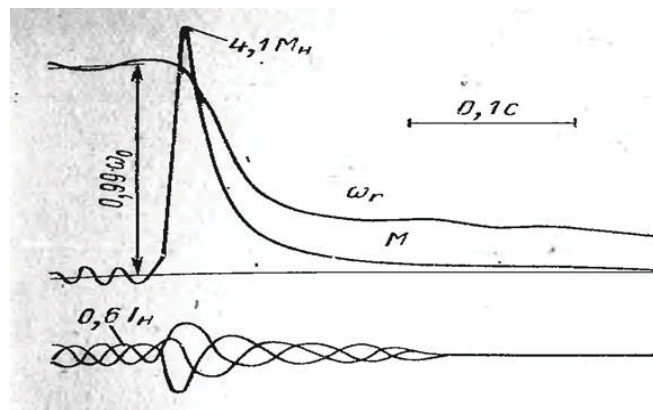


Рисунок 3.13 – Осциллограммы параметров магнитного торможения АД АО2-31-6 коротким замыканием статорной цепи

Таким образом, рудничные АД высокой мощности, обладая значительным собственным моментом инерции и функционируя в системе электроприводов с высоким моментом инерции, могут характеризоваться как электрические машины, торможение коротким замыканием которых протекает до достижения минимальных угловых скоростей ротора.

Из изложенного следует, что действие обратной ЭДС АД на точку к.з. в питающем кабеле носит кратковременный характер, сопоставимый по продолжительности с процессом защитного отключения напряжения питания сети и не проявляется по истечении этого процесса. Вместе с тем, включение схемы индукционно-динамического торможения АД и в случае возникновения междуфазного к.з. в сети питания АД не противоречит решению задачи противодействия обратным энергетическим потокам в ЭТК участка шахты.

3.3 Выводы по разделу 3

Исследованиями установлен эффект уменьшения величины количества электричества q в сопротивлении утечки на землю при закорачивании отключенной от сети обмотки статора двухскоростного АД, либо дополнительной обмотки статора односкоростного АД в режиме выбега двигателя в сравнении этим же параметрам при отсутствии указанного управляющего воздействия. При этом выявлена функциональная недостаточность данного защитного воздействия. В частности, установлен широкий диапазон длин и сечений кабелей марки КГЭШ в котором допустимый параметр электробезопасности ($q=50$ мА•с) вне зависимости от наличия, либо отсутствия эффекта закорачивания отключенной от сети дополнительной обмотки статора АД как применительно к односкоростному, так и применительно к двухскоростному двигателю. В частности, эффект ограничения параметра $q \leq 50$ мА•с будет отсутствовать применительно к кабелю:

- КГЭШ 3х35 мм² длиной более 200 м;
- КГЭШ 3х50 мм² длиной более 100 м;
- КГЭШ 3х70 мм² длиной более 100 м;

Установлено, что фактором усиления эффекта подавления обратной ЭДС АД является совмещение процесса формирования контура повышенного тока в цепи статора с процессом замедления ротора, что соответствует эффекту индукционно-динамического торможения АД, и позволяет ограничить величину количества электричества в цепи утечки тока на землю до безопасных ($q \leq 50$ мА•с) величин для всех сечений кабелей марки КГЭШ длиной до 300 м.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЭДС ДВУХСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Решение задачи подавления обратного энергетического потока АД на интервале выбега на основании использования математического аппарата и компьютерных моделей выявило два перспективных направления, каждое из которых реализуется методами управления электромагнитными параметрами электрической машины:

- создание контура короткого замыкания в дополнительной обмотке статора (вариант: создание контура короткого замыкания в отключенной обмотке статора двухскоростного АД) на интервале выбега;

- перевод АД в режим индукционно-динамического торможения подачей на статор однополупериодного тока и коммутацией вводов двух фаз статора через тиристор.

Модели указанных процессов дали положительный научный результат, что обуславливает целесообразность следующего этапа исследований – проведение экспериментов с целью выявления фактических показателей предложенных способов и установления степени адекватности теоретических разработок результатам эксперимента.

4.1 Процесс подавления обратной ЭДС двухскоростного асинхронного двигателя методом управления параметрами отключенной обмотки статора. Разработка структуры исследовательского стенда и методики эксперимента

Структура экспериментального стенда представлена схемой (Рисунок 4.1), основу которого составляет двухскоростной асинхронный двигатель. В ходе

экспериментов предусмотрено использование АД типа ЭКВФ-315L12/4, имеющего две обмотки статора с числом полюсов 4 и 12, размещённые на общем магнитопроводе.

Двигатель рассчитан на номинальное напряжение сети 1140 В частоты 50 Гц и имеет следующие параметры:

- номинальная мощность 200/65 кВт;
- пусковой ток 480/1435 А;
- номинальная угловая скорость 1485/485 об/мин.

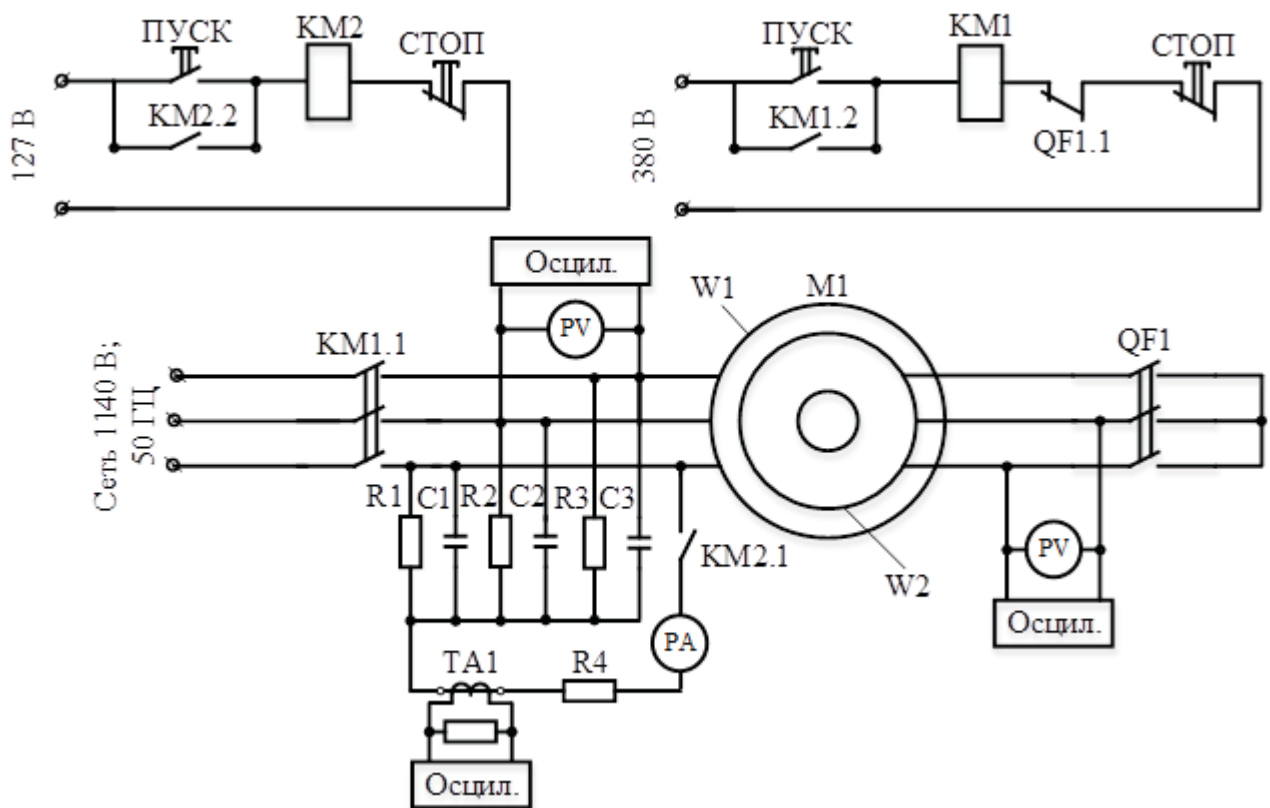


Рисунок 4.1 – Структура стенда для исследования процесса подавления обратной ЭДС двухскоростного АД методом закорачивания отключенной обмотки статора

В структуру стенда так же входит физический макет фрагмента электрической сети участка шахты, моделирующий совокупные активные и емкостные сопротивления изоляции и сопротивление цепи утечки тока на землю, подключаемые контактором KM2. Подключение рабочей обмотки статора

асинхронного двигателя к сети осуществляется контактором КМ1, включение и отключение контактора предусматривается от кнопочного поста, кроме этого отключение данного контактора осуществляется размыкающим слаботочным контактом автоматического выключателя QF1, который предусматривается для закорачивания второй не подключаемой к сети обмотки статора. Таким образом, схема стенда позволяет фиксировать ток в цепи утечки на землю на интервалах работы асинхронного двигателя, выбега АД при ненагруженной второй обмотке статора, а также выбега АД при закорачивании второй статорной обмотки.

Фиксация параметров и изменение линейных ЭДС рабочей и отключенной обмоток статоров АД (в т.ч. в процессе выбега) осуществляется цифровыми осциллографами *DS1052E* и вольтметрами.

Экспериментальный стенд (Рисунок 4.1) включает: коммутационные аппараты автоматический выключатель, магнитный пускатель, резисторы $R1=R2=R3 = 100$ кОм; конденсаторы $C1=C2=C3=0.5$ мкФ, сопротивление цепи утечки тока на землю $R_{ут}=1$ кОм; трансформатор тока ТА1=32 А.

С использованием стенда описанной конфигурации проведены эксперименты в области исследования параметров сети электропитания двухскоростного асинхронного двигателя, при возникновении недопустимо низкого электрического сопротивления между фазой сети и землей, определенного нормативными документами как сопротивление тела человека ($R_{ут} = 1$ кОм) [57]. Кроме того, исследована возможность ограничения обратных энергетических потоков асинхронного двухскоростного двигателя замыканием дополнительной статорной обмотки. Так в цепи утечки ($R4$) регистрируется и измеряется цифровым осциллографом *DS1052E* и амперметром.

Методика проведения эксперимента предусматривает регистрацию тока в цепи утечки на землю при следующих состояниях схемы:

- после подачи напряжения на обмотку W1 и выхода двигателя в рабочий режим, замыканием контактора КМ2 создается цепь утечки тока на землю. В это же время отключается цепь питания статора W1 контактором КМ1 и регистрируются параметры тока в цепи утечки.

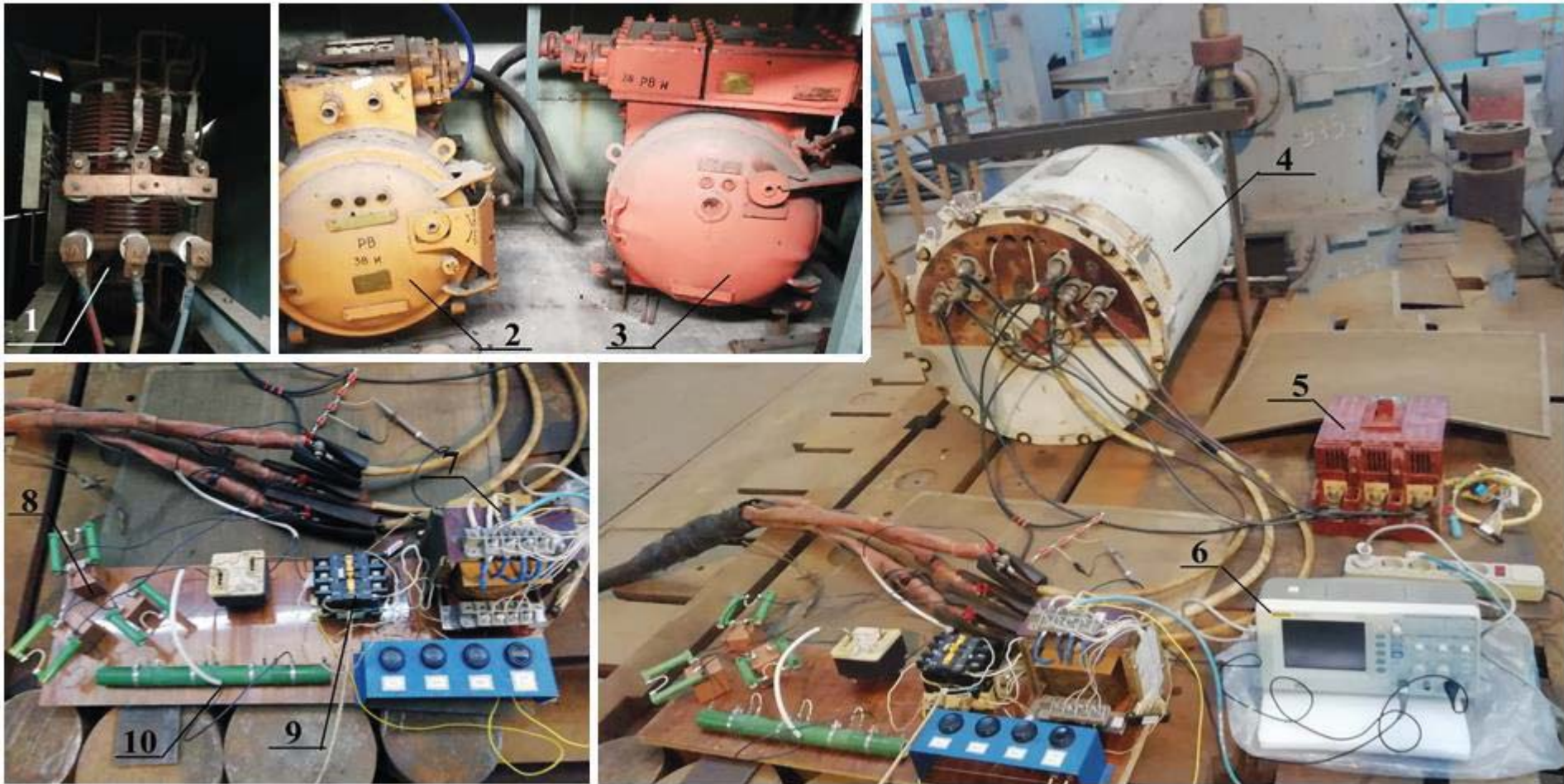


Рисунок 4.2 – Внешний вид исследовательского стенда: силовой трансформатор 6/1,14 кВ (1); автоматический выключатель (3); магнитный пускатель (2); двухскоростной асинхронный двигатель типа ЭКВФ-315L12/4 (4); автоматический выключатель QF1 (5); осциллограф (6); понижающий трансформатор собственных нужд (7); RC –цепь (8); контакт автоматического выключателя QF1 (9)

- после подачи напряжения на обмотку W2 и выхода двигателя в рабочий режим, замыканием контактора KM2 создается цепь утечки тока на землю. В это же время контактором KM1 отключается цепь питания статора W1. Регистрируется значение тока в цепи утечки.

- после подачи напряжения на статор W1 и выхода двигателя в рабочий режим, контактором KM2 создается цепь утечки тока на землю, в следующий момент включается автоматический выключатель QF1, закорачивая обмотку W2, контактором KM1 отключается цепь питания статора W1. На всем протяжении опыта регистрируется ток утечки.

- после подачи напряжения на статор W2 и выхода двигателя в рабочий режим, контактором KM2 создается цепь утечки тока на землю, в следующий момент включается автоматический выключатель QF1, закорачивая обмотку W1, контактором KM1 отключается цепь питания статора W2. На всем протяжении опыта регистрируется ток утечки.

Кроме этого, регистрация параметров линейного напряжения обмоток статора может быть осуществлена при следующих состояниях схемы:

- линейное напряжение обмотки W2, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W1 не закорочена;

- линейное напряжение обмотки W1, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W2 не закорочена;

- линейное напряжение обмотки W2, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W1 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора KM1;

- линейное напряжение обмотки W1, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W2 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора KM1.

Регистрация параметров ЭДС обмоток статора в режиме выбега АД может быть выполнена при следующих состояниях схемы:

- линейная ЭДС обмотки W2 при включенной в сеть обмотке W1, а также в момент её отключения и после отключения от сети;

- линейная ЭДС обмотки W1 при включенной в сеть обмотке W2, а также в момент её отключения от сети и после отключения от сети;
- линейное напряжение (ЭДС) обмотки W1 до и после отключения её от сети (обмотка W2 не закорочена);
- линейное напряжение (ЭДС) обмотки W2 до и после отключения её от сети (обмотка W1 не закорочена);
- линейное напряжение (ЭДС) обмотки W1 до и после отключения её от сети (обмотка W2 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора KM1);
- линейное напряжение (ЭДС) обмотки W2 до и после отключения её от сети (обмотка W1 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора KM2).

4.2 Анализ результатов экспериментов по п.4.1

Исследования проведены в соответствии с программой и методикой, представленными в п.4.1. В частности, анализировались переходные процессы при включении и отключении двухскоростного асинхронного двигателя в обмотках номинальной и пониженной скоростей (Рисунок 4.3а, Рисунок 4.4, Рисунок 4.7).

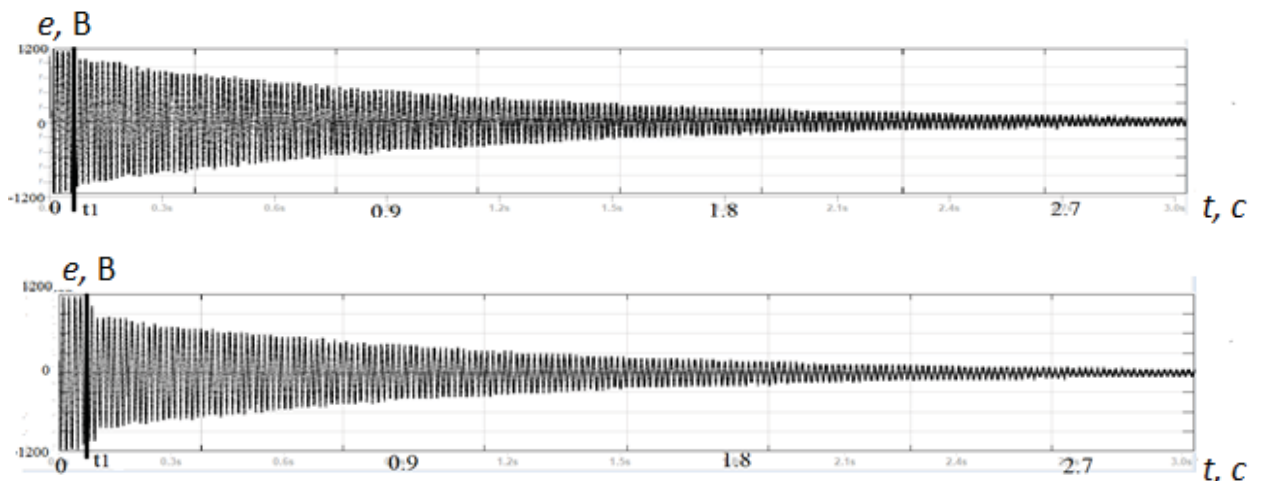


Рисунок 4.3 – Диаграммы изменения формирования обратной ЭДС в обмотке W1 статора двухскоростного АД: а - без учета замыкания цепи обмотки W2 (t_1 – момент отключения KM1); б - с учетом замыкания цепи обмотки W2 (t_1 – момент отключения KM1; замыкания QF1)

Кроме того, проанализированы переходные процессы в АД при замыкании одной из обмоток (Рисунок 4.3б, Рисунок 4.5, Рисунок 4.6).

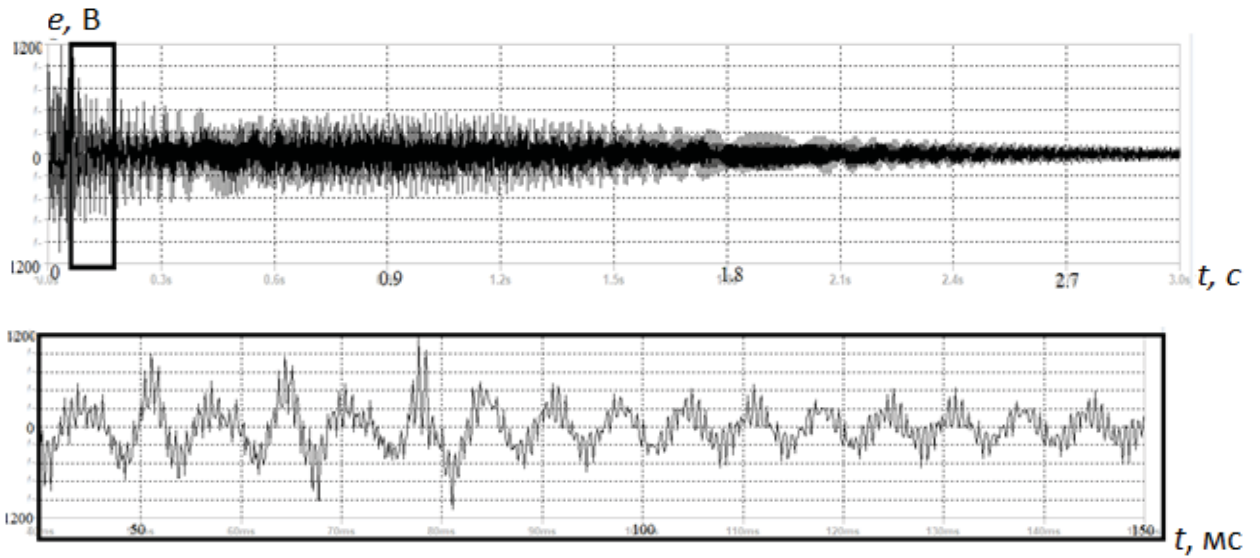


Рисунок 4.4 – Диаграммы изменения формирования обратной ЭДС в (отключенной) обмотке W2 статора двухскоростного АД

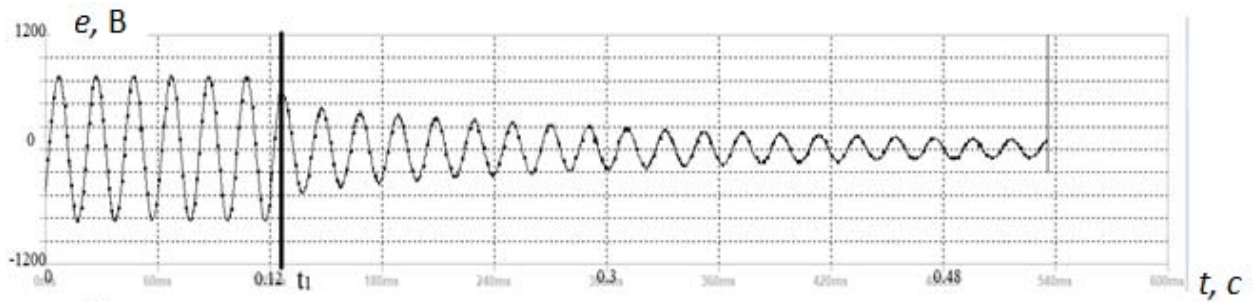


Рисунок 4.5 – Диаграммы изменения формирования обратной ЭДС в обмотке W2 статора двухскоростного АД без учета замыкания цепи обмотки W1 (t_1 – момент отключения КМ1)

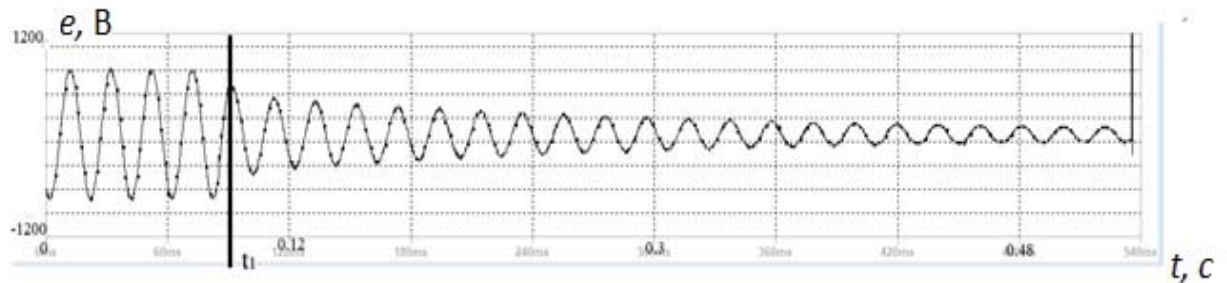


Рисунок 4.6 – Диаграммы изменения формирования обратной ЭДС в обмотке W2 статора двухскоростного АД с учетом замыкания цепи обмотки W1 (t_1 – момент отключения КМ1; замыкания QF1)

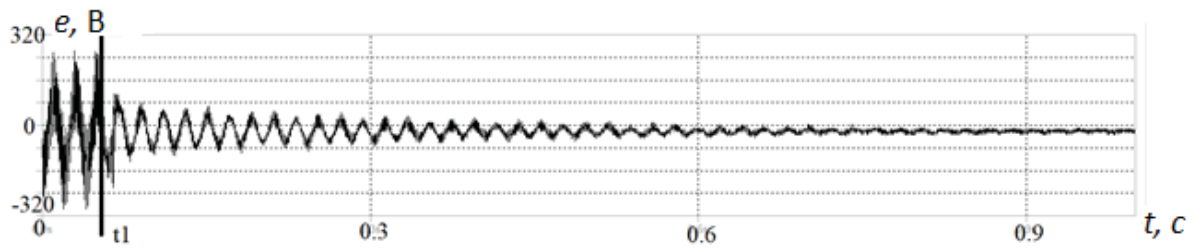


Рисунок 4.7 – Диаграммы изменения формирования обратной ЭДС в (отключенной) обмотке W1 статора двухскоростного АД (t_1 – момент отключения КМ1)

Условия исследований № 3 и №4 (п. 4.1) предполагают создание цепи утечки тока на землю контактором КМ2 в каждой из обмоток поочередно (Рисунок 4.8 – Рисунок 4.9).

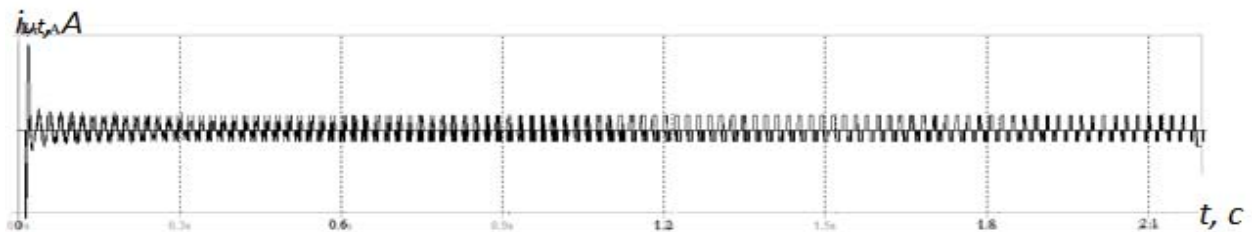


Рисунок 4.8 – Диаграмма изменения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля статорной обмотки (W1) без учета замыкания цепи обмотки W2 (t_1 – момент отключения КМ1)

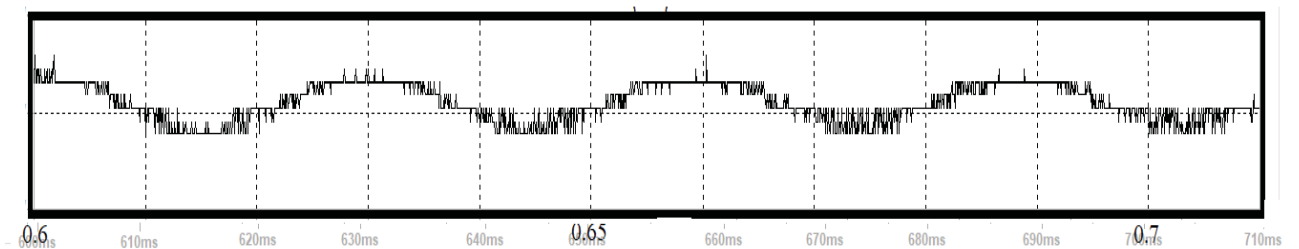
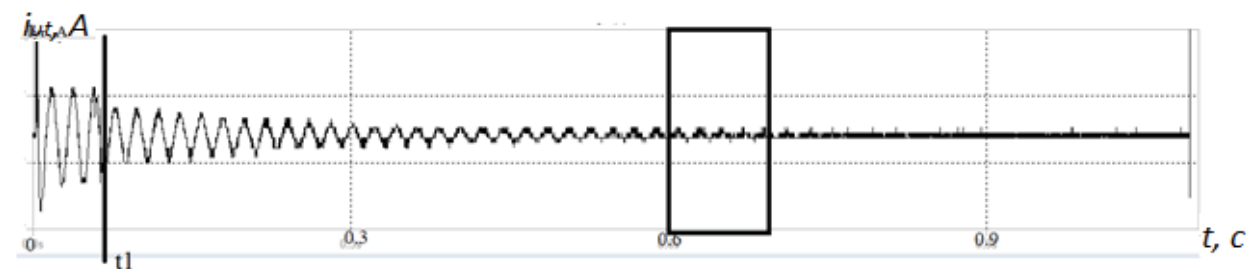


Рисунок 4.9 – Диаграмма изменения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля статорной обмотки (W2) без учета замыкания цепи обмотки W1 (t_1 – момент отключения КМ1)

Условия исследований №5 и №6 (п. 4.1) предполагают создание цепи утечки тока на землю контактором КМ2 и одновременно с этим закорачивание второй (отключенной) статорной обмотки автоматическим выключателем QF1. Исследование проводилось для каждой обмотки поочередно (Рисунок 4.10, Рисунок 4.11).

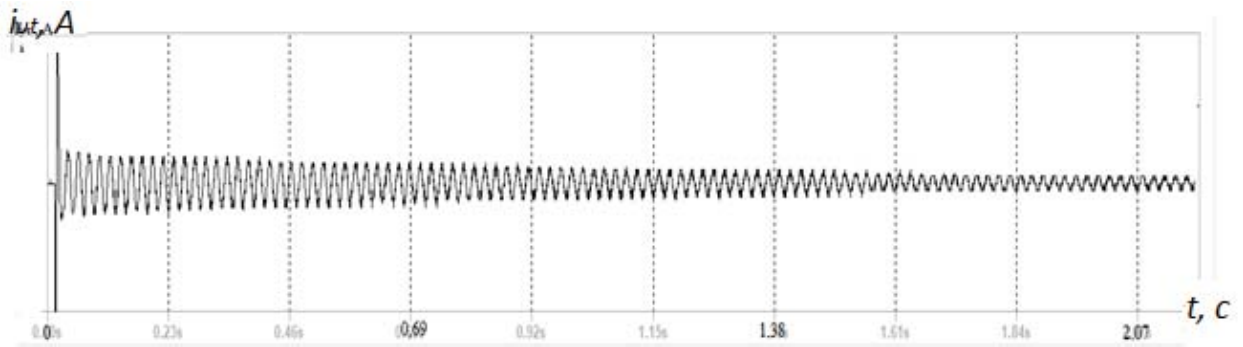


Рисунок 4.10 – Диаграмма изменения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля статорной обмотки (W1) с учетом замыкания цепи обмотки W2

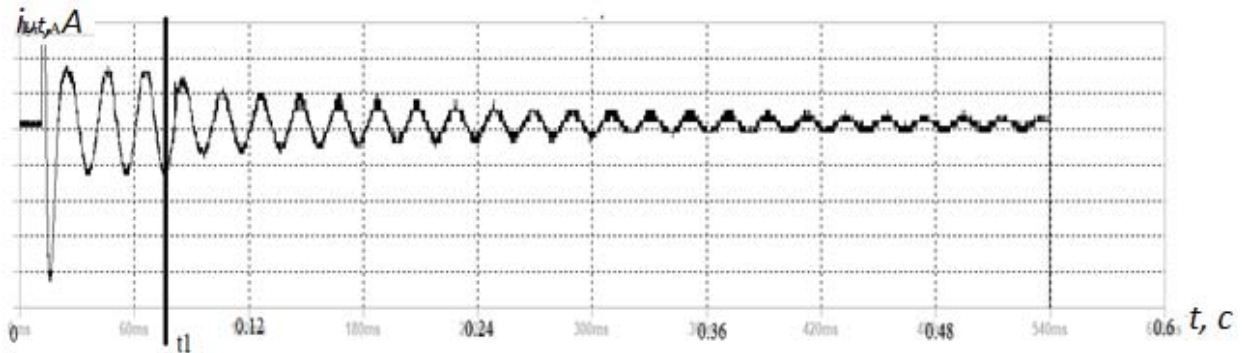


Рисунок 4.11 – Диаграмма изменения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля статорной обмотки (W2) с учетом замыкания цепи обмотки W1

Исследованиями, в частности, установлено, что опасность электропоражения человека появляется в случае касания отключенной обмотки статора двухскоростного АД (Рисунок 4.12 – Рисунок 4.13).

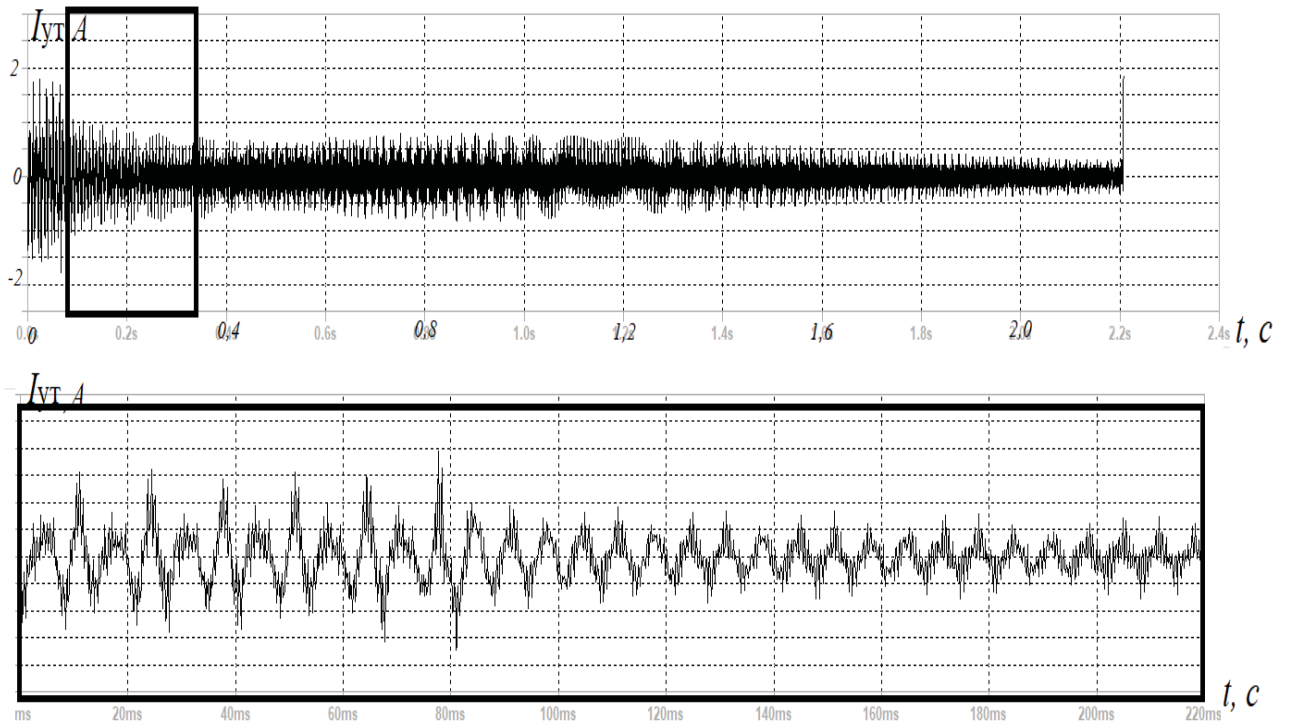


Рисунок 4.12 – Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки (W2) двухскоростного АД

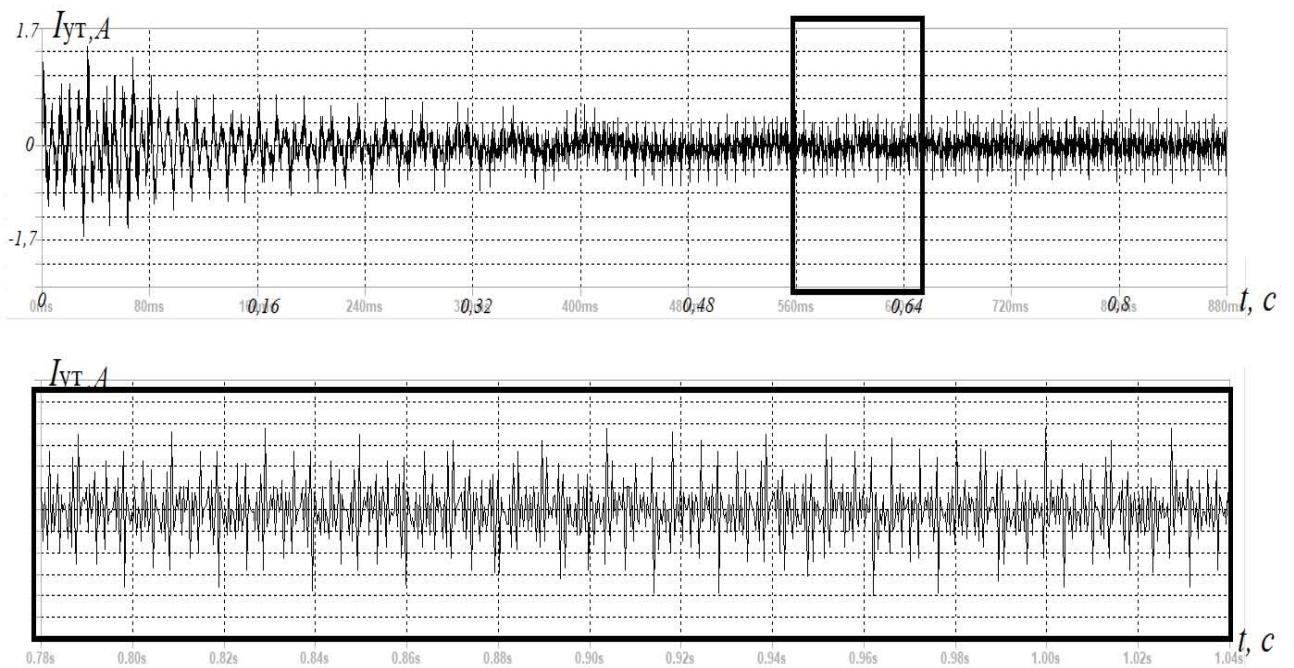


Рисунок 4.13 – Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки (W1) двухскоростного АД

Это подтверждается соответствующими диаграммами накопления количества электричества $q=f(t)$ в цепи утечки на землю (Рисунок 4.14 – Рисунок 4.15) и согласуется с результатами теоретических исследований (п. 2.1.2) с отклонением 4%

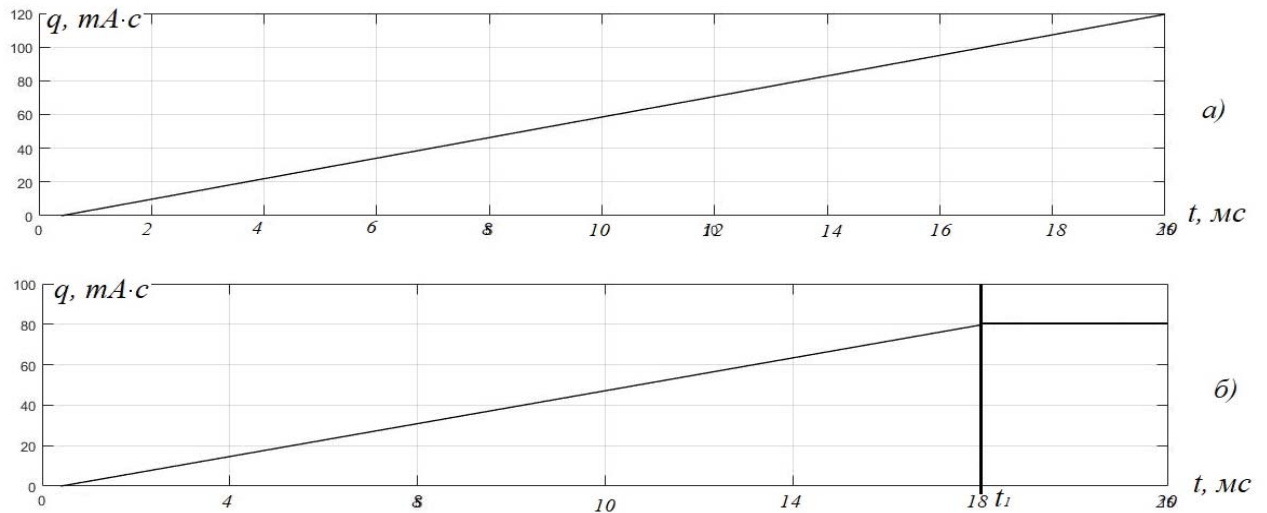


Рисунок 4.14 – Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю в цепи подключения статора номинальной скорости при отсутствии (а) и наличии (б) закорачивания статора пониженной скорости

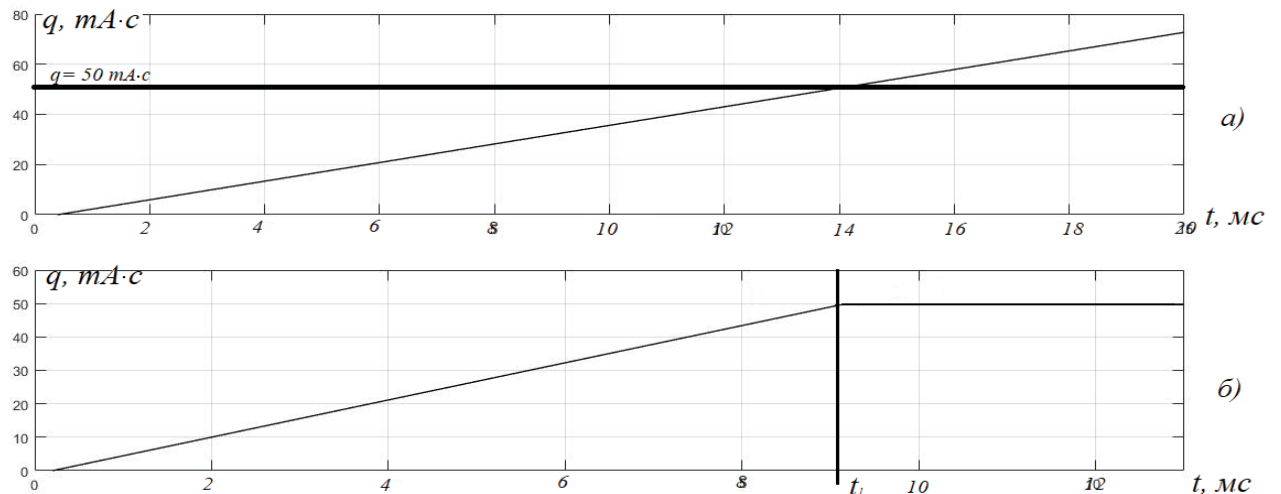


Рисунок 4.15 – Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю в цепи подключения статора пониженной скорости при отсутствии (а) и наличии (б) закорачивания статора номинальной скорости

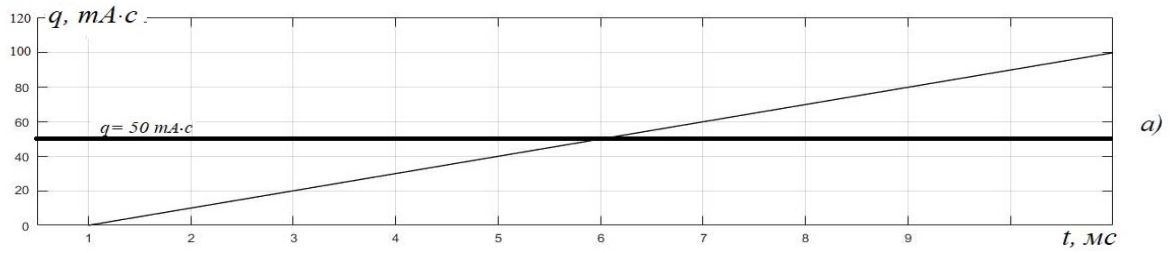


Рисунок 4.16 – Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю в цепи подключения (отключенной) обмотки статора номинальной скорости при отсутствии закорачивания статора номинальной скорости

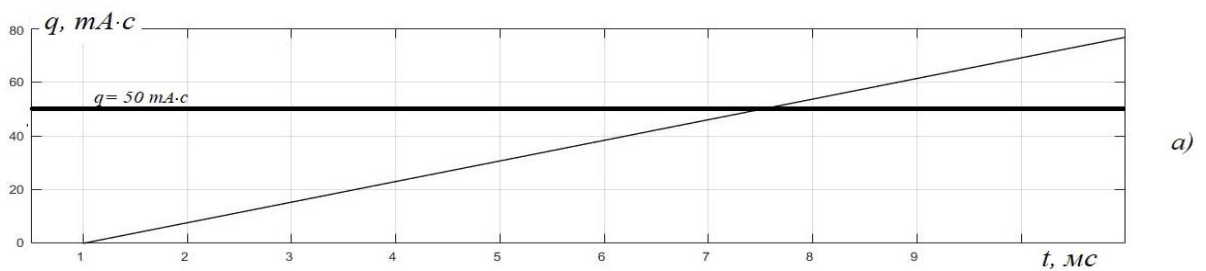


Рисунок 4.17 – Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю в цепи подключения (отключенной) обмотки статора пониженной скорости при отсутствии закорачивания статора пониженной скорости

Условия исследований №7 и №8 (п. 4.1) предполагают регистрацию линейного напряжения обмоток статора в линии связанной с цепью утечки как при замыкании (отключенной) статорной обмотки, так и при отсутствии его (Рисунок 4.18 – Рисунок 4.21).

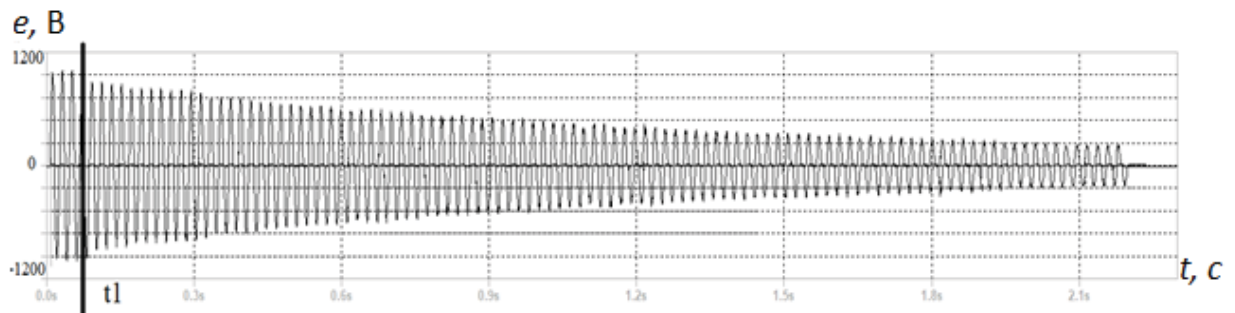


Рисунок 4.18 – Осциллограмма линейного напряжения обмотки $W1$, в линии связанной с цепью утечки, обмотка $W2$ не закорочена (t_1 – момент отключения КМ1)

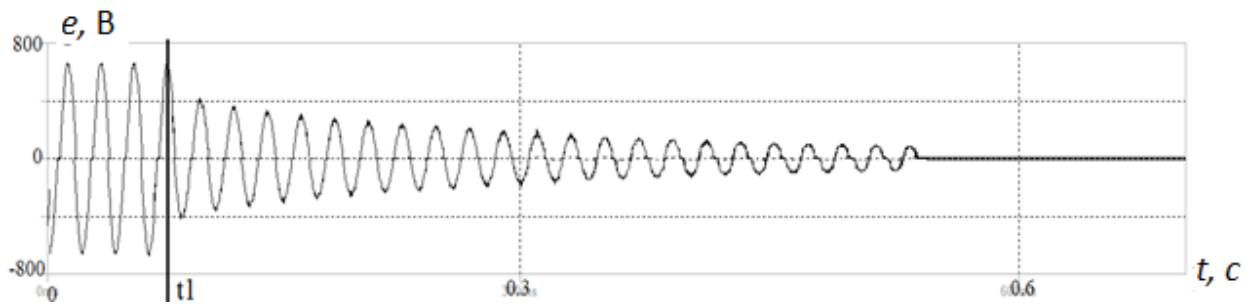


Рисунок 4.19 – Осциллограмма линейного напряжения обмотки W2, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W1 не закорочена (t_1 – момент отключения КМ1)

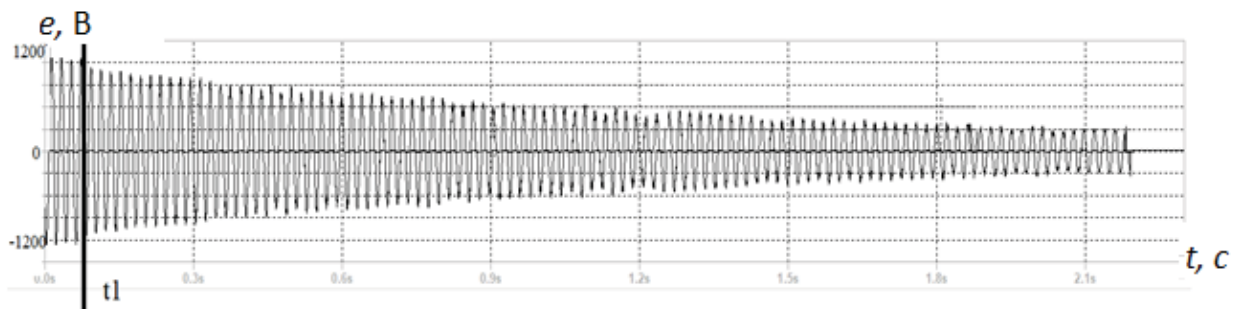


Рисунок 4.20 – Осциллограмма линейного напряжения обмотки W1, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W2 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора КМ1 (Рисунок 4.1) (t_1 – момент отключения КМ1; закорачивания QF1)

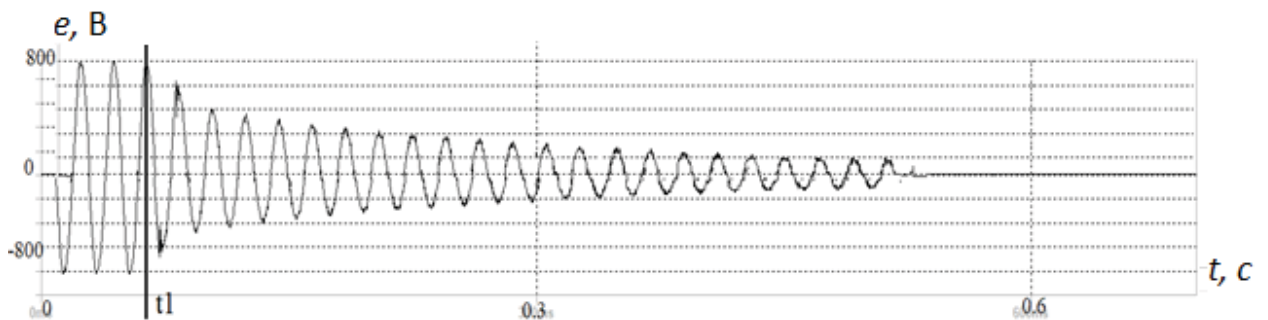


Рисунок 4.21 – Осциллограмма линейного напряжения обмотки W2, в линии связанной с цепью утечки, обмотка W1 закорачивается автоматическим выключателем QF1 в момент отключения контактора КМ1 (Рисунок 4.1) (t_1 – момент отключения КМ1; закорачивания QF1)

В соответствии с полученными результатами эксперимента можно сделать вывод, что замыкание отключенной обмотки статора двухскоростного

асинхронного двигателя создаёт потенциальную возможность ограничения параметров обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки этого же двигателя. Численные значения измеренного параметра сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Величины накопления количества электричества через сопротивление утечки тока на землю после защитного отключения сети участка шахты с учетом и без учета закорачивания отключенной обмотки статора АД

	Без закорачивания отключенной статорной обмотки двухскоростного АД	С закорачиванием отключенной статорной обмотки двухскоростного АД
W1	104 мА·с	82 мА·с
W2	78 мА·с	50 мА·с

С учётом зафиксированных параметров изменения тока в цепи утечки на землю построены характеристики накопления количества электричества $q=f(t)$ на сопротивлении утечки (имитация тела человека, прикоснувшегося к фазе сети). Результаты представлены на рисунке 4.14 и рисунке 4.15, где приведены характеристики $q=f(t)$ в цепи подключения статора номинальной скорости при наличии и отсутствии закорачивания статора пониженной скорости (Рисунок 4.14,а и Рисунок 4.14,б, соответственно). Кроме этого, приведены характеристики $q=f(t)$ в цепи подключения статора пониженной скорости при наличии и отсутствии закорачивания обмотки статора номинальной скорости (Рисунок 4.15,а и Рисунок 4.15,б, соответственно).

Их анализ, а также их сопоставление с результатами компьютерного моделирования (п. 2.1.2) позволяют сделать следующие выводы.

- в отключенной от сети обмотке статора работающего двухскоростного АД подтверждено наличие потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величины ЭДС.

- выявлена потенциальная возможность влияния на параметры обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки статора двухскоростного АД в режиме выбега посредством замыкания отключенной статорной обмотки этого же двигателя, однако длительность существования тока в цепи утечки в присоединении данной обмотки и контура «земля» снижается несущественно, а также количество электричества в цепи утечки тока на землю не ограничивается до безопасных пределов;

- выявлена потенциальная возможность снижения длительности существования тока в цепи утечки в присоединении отключенной обмотки асинхронного двигателя и контура «земля» посредством замыкания данной статорной обмотки этого же двигателя.

В ходе анализа процессов при закорачивании отключенной статорной обмотки двухскоростного асинхронного двигателя выявлен эффект немгновенного подавления обратной ЭДС обмотки статора двухскоростного АД. Это является основанием для утверждения о недостаточности функции подавления обратного энергетического потока двухскоростного АД закорачиванием отключенной обмотки его статора в контексте создания гарантированного электробезопасного состояния электросети участка шахты после её отключения (на интервале выбега АД потребителей).

4.3 Процесс подавления обратной ЭДС асинхронного двигателя методом его перевода в режим индукционно-динамического торможения. Разработка структуры исследовательского стенда и методики эксперимента

Процесс индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя может быть реализован схемой (Рисунок 4.22) на основе применения трёхфазного тиристорного регулятора напряжения (ТРН), т.е. трёх пар встречно-параллельно соединенных тиристоров VS1-VS6 (по одной в каждой фазе).

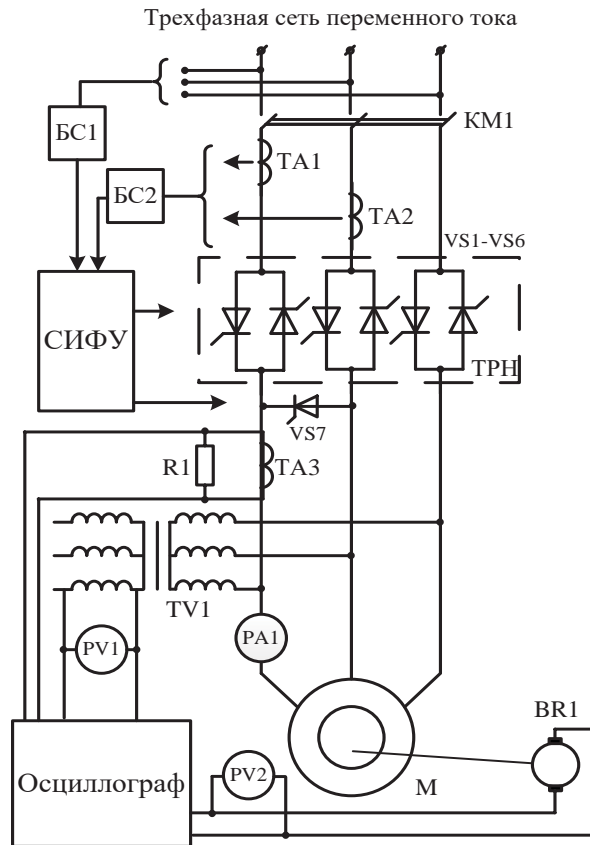


Рисунок 4.22 – Типовая схема реализации режима индукционно-динамического торможения АД на основе применения трёхфазного тиристорного регулятора напряжения

В этом случае перевод двигателя М в режим динамического торможения осуществляется отключением тиристоров VS2, VS3, VS5, VS6 (тиристоры VS1 и VS3 остаются в работе). Эффект индукционного торможения создается включением тиристора VS7 после исчезновения тока в цепях тиристоров VS2 и VS3 (контролируется с использованием трансформаторов тока ТА1; ТА2 и блока синхронизации БС2). Управление тиристорами VS1; VS4; VS7 осуществляется системой импульсно-фазового управления СИФУ, синхронизированной с напряжениями сети через блок синхронизации БС1. Интенсивность торможения АД регулируется углами отпирания тиристоров VS1; VS4; VS7.

Регистрация параметров процесса выполнена на многоканальном шлейфовом осциллографе Н-117. Контролируемыми параметрами приняты:

- фазный ток (в цепи 1-й фазы асинхронного двигателя М) снимаемый с трансформатора тока ТА3;

- фазное напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжения TV1;

- параметр угловой скорости ротора двигателя М1, снимаемый с датчика скорости BR1.

Для тарировки регистрируемых параметров использованы вольтметры PV1 и PV2, амперметр PA1. В составе стенда использовался асинхронный двигатель КОФ-32 мощностью 32 кВт. Линейное напряжение сети 380 В, частота 50 Гц. Нагрузкой двигателя служит редуктор и вал приводного блока скребкового конвейера (СП-63), что относит процесс к режиму, близкому к холостому ходу (работа при малом моменте сопротивления).

4.4 Анализ результатов экспериментов по п.4.3

В ходе экспериментов измерены параметры тока статора, ЭДС вращения ротора и скорости асинхронного двигателя КОФ-32. Соответствующие осциллограммы при углах управления тиристорами VS1 и VS4 $\alpha=100-135$ эл. град. представлены на рисунках 4.23 - 4.25. С целью ограничения (недопущения) динамических перегрузок двигателя в процессе ИДТ отпирание тиристоров VS1 и VS4 с углами $\alpha < 100$ эл. град не предпринималось.

Из анализа осциллограмм следует, что в режиме индукционно-динамического торможения достигается эффект регулируемой интенсивности снижения угловой скорости ω АД ($\omega=f(\alpha)$), при этом может быть обеспечен малоинтенсивный процесс снижения параметра ω . В диапазоне углов α отпирания тиристоров VS1, VS4 от 100 до 135 эл. град. Продолжительность снижения угловой скорости АД (ω) находится в диапазоне (1.18 с – 0.94 с). При этом продолжительность снижения ЭДС вращения АД в указанном диапазоне углов α отпирания тиристоров VS1 и VS4 является почти неизменной и составляет от 8 до 10 периодов напряжения сети (0,16 с ÷ 0,20

с). Это свидетельствует о преимущественном влиянии на параметр ЭДС вращения АД эффекта создания цепи индукционного тока через тиристор VS7 при полном его отпирании.

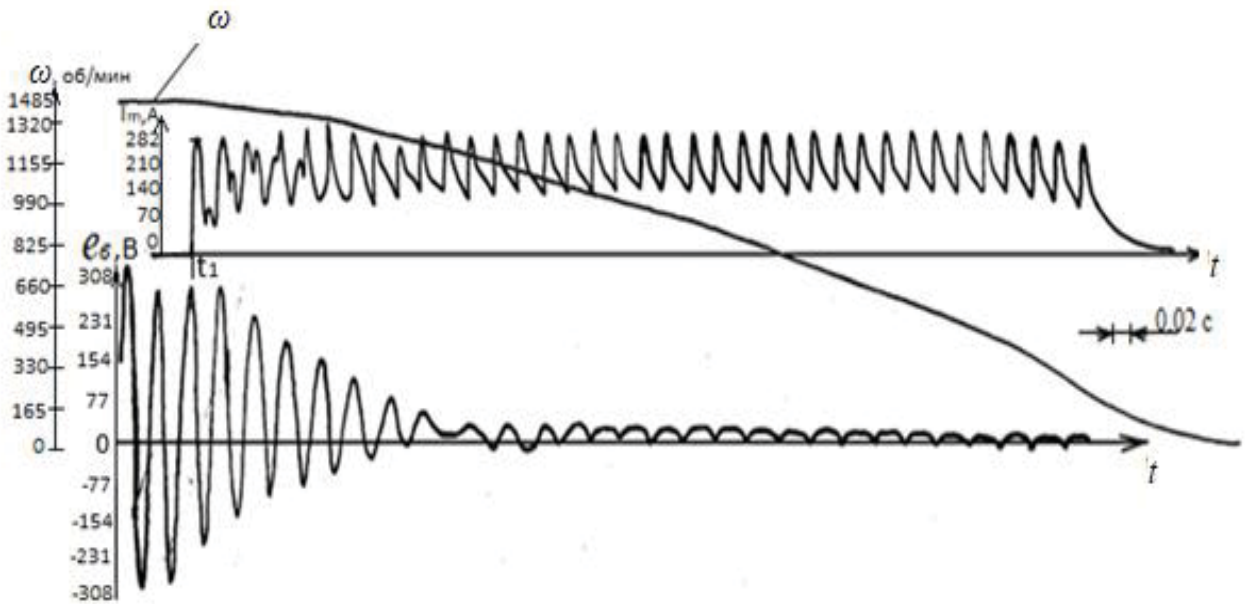


Рисунок 4.23 – Осциллограммы тока статора, ЭДС вращения ротора и скорости асинхронного двигателя КОФ-32 при индукционно-динамическом торможении ($\alpha=100$ эл. град.): t_1 – момент начала ИДТ

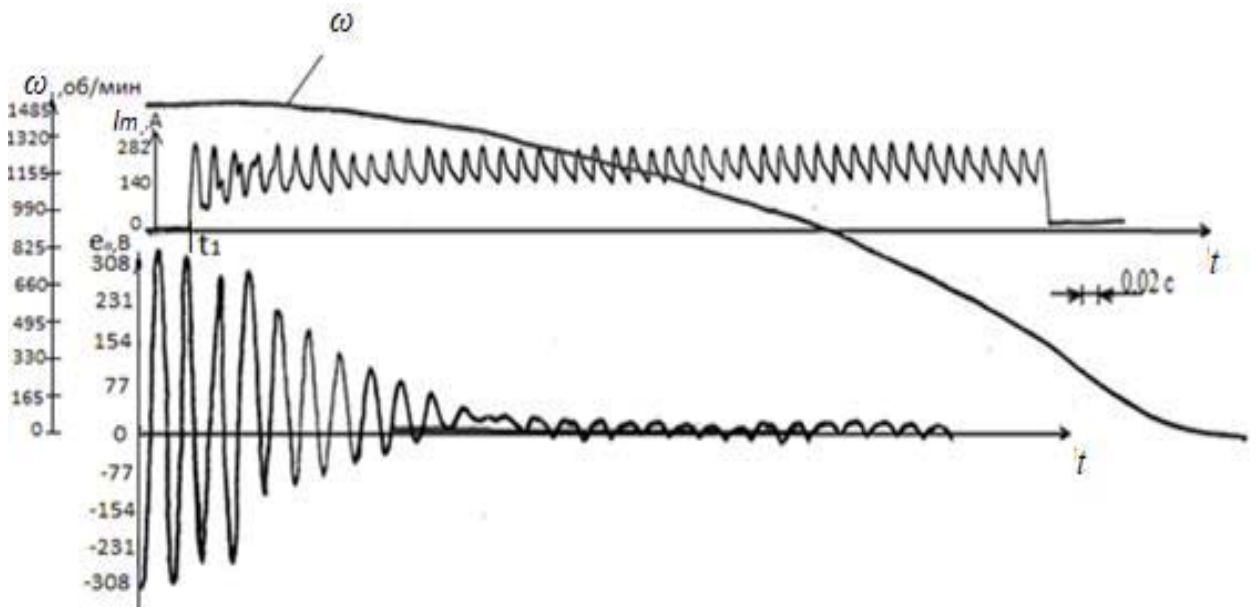


Рисунок 4.24 – Осциллограммы тока статора, ЭДС вращения ротора и скорости асинхронного двигателя КОФ-32 при индукционно-динамическом торможении ($\alpha=120$ эл. град.): t_1 – момент начала ИДТ

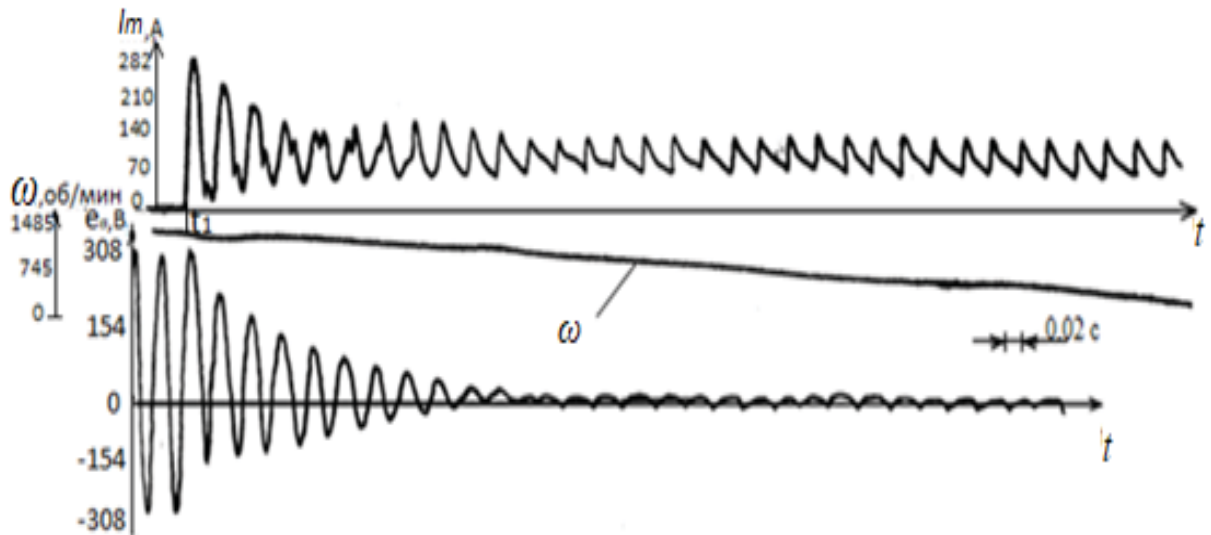


Рисунок 4.25 – Осциллограммы тока статора, ЭДС вращения ротора и скорости асинхронного двигателя КОФ-32 при индукционно-динамическом торможении ($\alpha=135$ эл. град.): t_1 – момент начала ИДТ

С учетом полученных параметров ЭДС статора АД в процессе индукционно-динамического торможения расчетная величина накопления количества электричества $q=f(t, \alpha)$ представлена трехмерным графиком (Рисунок 4.26), что согласуется с результатами теоретических исследований (п. 2.2).

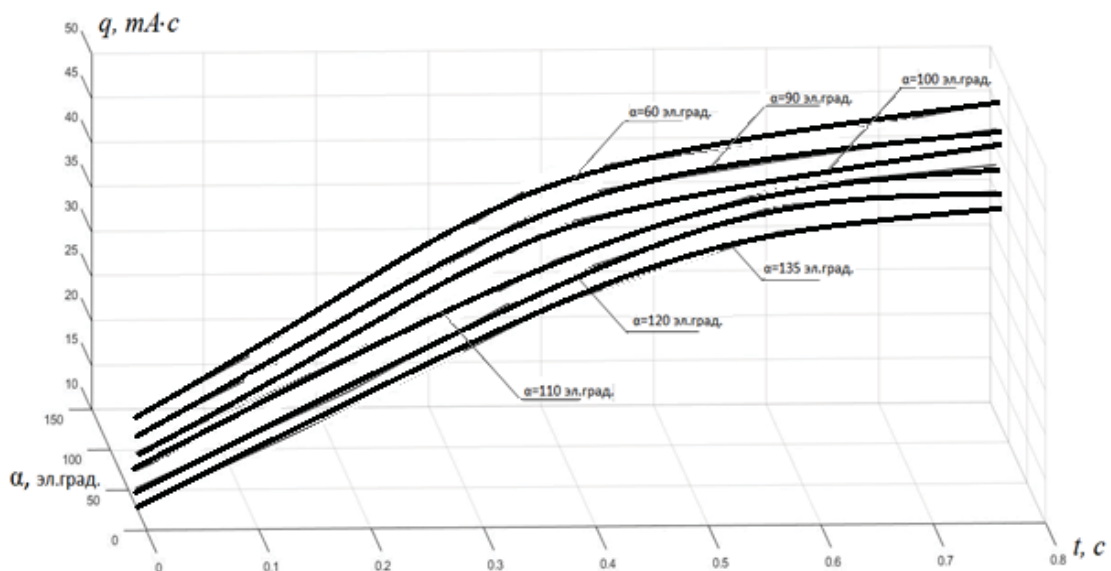


Рисунок 4.26 – График величин накопления количества электричества в цепи утечки тока на землю при индукционно-динамическом торможении ($\alpha=60-135$ эл. град)

Таким образом, подтверждена целесообразность применения метода индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя потребителя в качестве способа прекращения опасного состояния шахтной участковой электрической сети после защитного отключения утечки тока на землю, либо междуфазного к.з.

4.5 Выводы по разделу 4

Возможность использования результатов экспериментальных исследований для установления адекватности, обоснованной в разделе 2 математической модели электротехнического комплекса, обеспечивается:

1) достоверностью экспериментального материала за счет:

- идентичности исследовательского стенда типичному ЭТК участка шахты;

- использования цифровых средств измерения, регистрации и обработки данных с удовлетворительной быстротой и разрешением;

2) достаточностью экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования подтвердили достоверность полученных результатов при математическом и компьютерном моделировании с допустимыми значениями относительных погрешностей расчетов:

- подтверждено наличие потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величины ЭДС в отключенной от сети обмотке статора работающего двухскоростного АД.

- доказана потенциальная возможность влияния на параметры обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки статора двухскоростного АД в режиме выбега посредством замыкания отключенной статорной обмотки этого же двигателя и снижения длительности существования тока в цепи утечки в присоединении подключенной к сети обмотки и контура «земля»;

- доказана потенциальная возможность снижения длительности существования тока в цепи утечки в присоединении отключенной обмотки

асинхронного двигателя и контура «земля» посредством замыкания данной статорной обмотки этого же двигателя;

- подтверждена возможность применения метода индукционно-динамического и последующего индукционного торможения асинхронного двигателя потребителя в качестве способа прекращения опасного состояния шахтной участковой электрической сети после защитного отключения утечки тока на землю, либо междуфазного к.з..

РАЗДЕЛ 5

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Совершенствование способа выявления аварийного состояния кабельной сети средствами локального размещения и автономного действия

Техническая реализация результатов диссертационного исследования предполагает комплексный подход к обоснованию структуры устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД на интервале выбега. В этой связи принципиально важным является обоснование структуры устройства выявления аварийного состояния силового присоединения асинхронного двигателя. В этой связи принципиально важным является возможность функционирования устройства в автономном режиме (без подчинения защитным функциям устройств со стороны ТП) с размещением, в том числе, и со стороны вводов АД потребителя, т.е. после точки (места) повреждения кабеля.

Представляется рациональным использовать при разработке допущение, выдвинутое в работе [43] о том, что в условиях применения гибких экранированных кабелей на участке шахты (что регламентируется Правилами безопасности [40]) как повреждение изоляции, так и междуфазное к.з. в кабеле будет сопровождаться соединением силовой жилы либо нескольких силовых жил кабеля с контуром «земля» через заземляющую жилу и экраны.

Рассматривая известное техническое решение (Рисунок 5.1, а) [93], можно сделать вывод о том, что формирование информационного сигнала в виде импульса напряжения ограниченной продолжительности на резисторе R4 будет иметь место в случае контакта одной или двух фаз кабеля (присоединения к АД) к контуру «земля». Это наиболее вероятный случай аварийного состояния силового присоединения АД. В то же время работоспособность схемы исключается в случае мгновенного присоединения

всех трёх фаз сети к контуру «земля» через одинаковые по величине сопротивления утечки R_{ym1} - R_{ym3} , поскольку, в связи с равенством нулевых потенциалов точек «А» и «В», будет отсутствовать условие протекания тока по цепи контроля и формирования информационного сигнала на резисторе $R4$.

С целью распространения функции схемы выявления аварийного состояния кабеля (Рисунок 5.1) на состояния мгновенного контакта трёх фаз с контуром «земля» представляется рациональным сохранить концепцию формирования информационного импульса напряжения как функции протекания постоянного тока (ограниченной продолжительности) от присоединений статора АД на контур «земля» по конденсаторно-полупроводниковой цепи. Однако, с целью недопущения равенства потенциалов общей точки контактов сопротивлений утечки R_{ym1} - R_{ym3} (точка «В», Рисунок 5.1) и общей точки присоединения измерительного устройства к сети (точка «А», Рисунок 5.1) схема должна быть дополнена последовательным подключением источника постоянного тока $A2$ (Рисунок 5.2) [94, 95, 96].

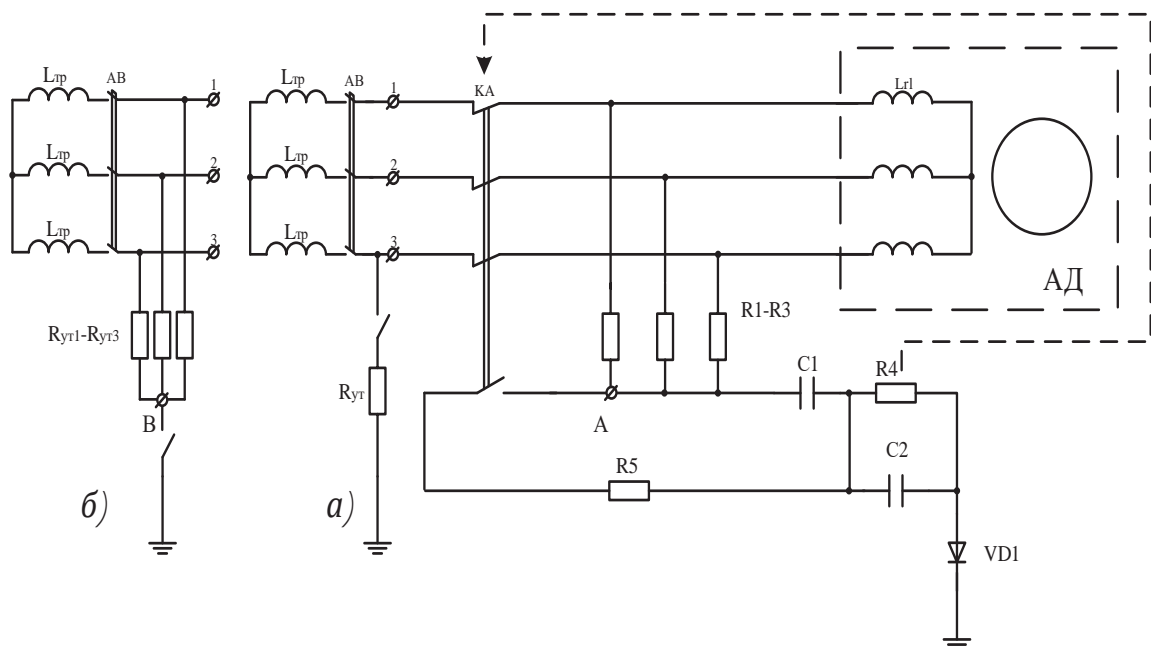


Рисунок 5.1 – Иллюстрация вывода об ограничении функциональности схемы выявления аварийного состояния кабеля по источнику [93]

принято $U_{\phi} = 1140$ В) с параметрами комплектной трансформаторной подстанции КТПВ-1000, предусмотрено наличие одного потребителя - АД с обобщенными активно-индуктивными сопротивлениями в соответствии с параметрами электрических машин типа 2ЭДКОФВ250М4. Сеть гибких кабелей соответствует параметрам кабелей марки КГЭШ сечением 50 мм^2 и длиной 300 м. Активные сопротивления изоляции $R_{из}$ кабеля должны находиться в нормированных пределах и в условиях опыта могут составлять 100 кОм/фазу .

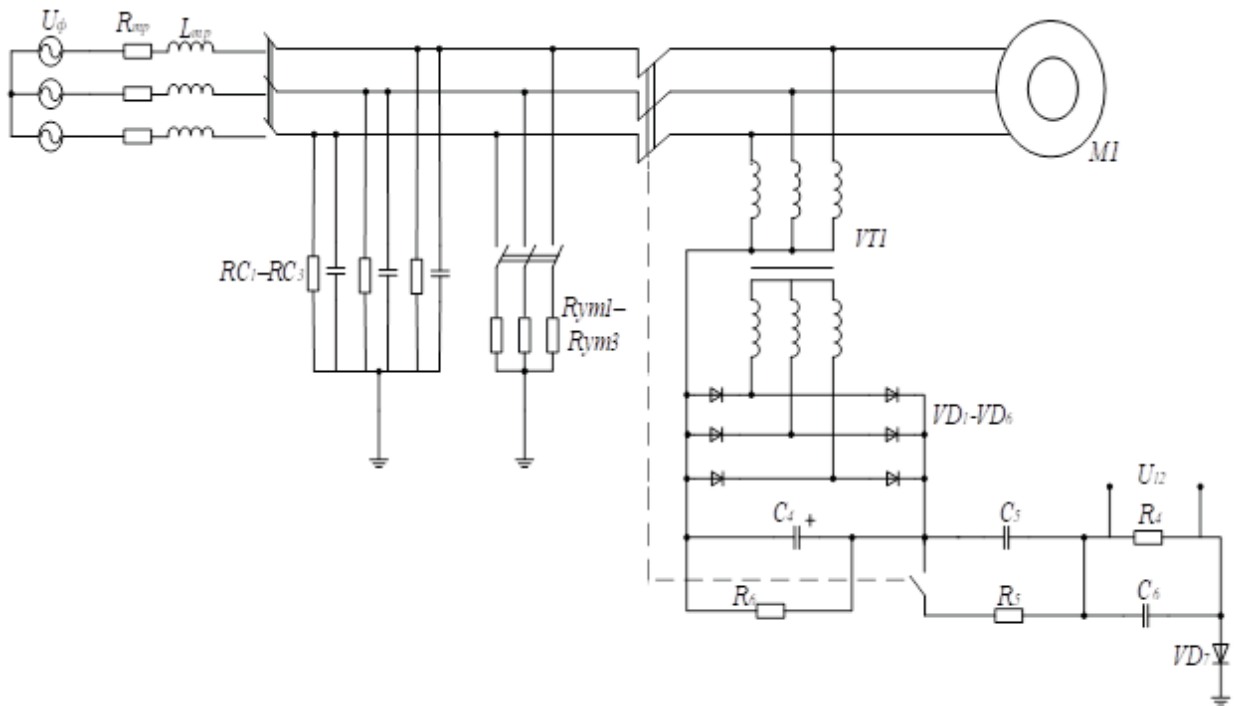


Рисунок 5.3 – Схема состояния электрической сети питания АД в случае выявления мгновенного трёхфазного замыкания на землю универсальным устройством контроля со стороны присоединений статора

Принимается емкость изоляции 0.5 мкФ/фазу , сопротивление утечки каждой фазы $R_{ум1}=R_{ум2}=R_{ум3}=1 \text{ кОм}$, выходное напряжение выпрямителя $VD1=VD6=10\text{В}$. Информационный сигнал (Рисунок 5.4), снимаемый с резистора $R4=10\text{кОм}$ (Рисунок 5.3) представляет собой импульсный сигнал, достаточный по амплитуде для фиксации схемой исполнительного органа отключения от сети обратной ЭДС асинхронного двигателя MI .

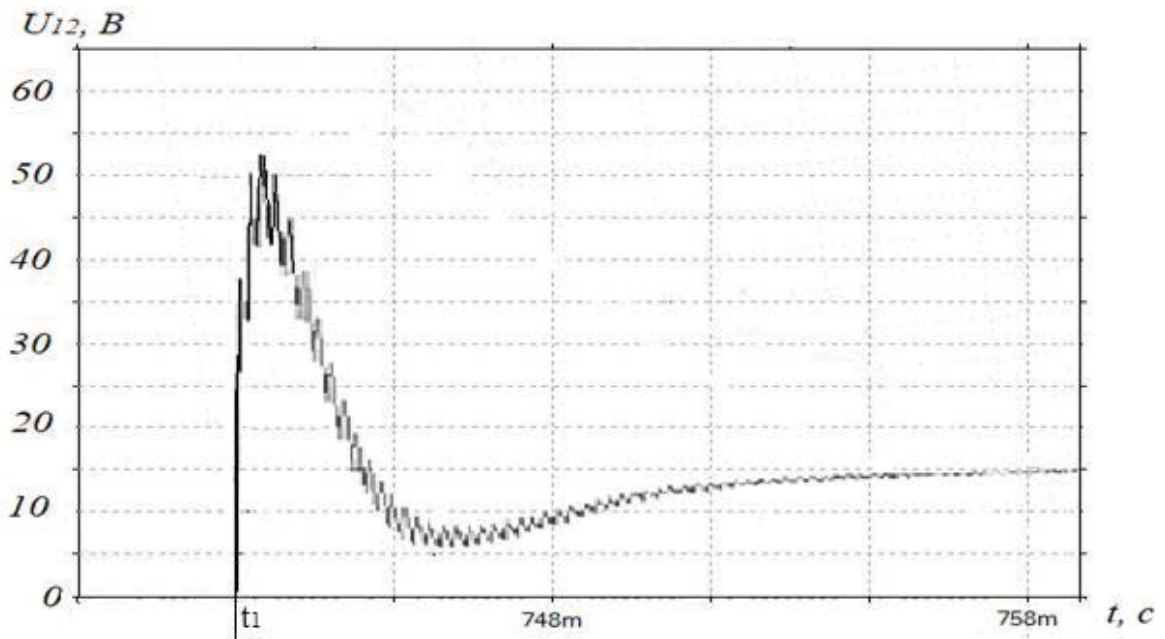


Рисунок 5.4 – Напряжение на контролируемом резисторе $R4$ при возникновении цепи мгновенного контакта трёх фаз сети на контур «земля» (t_1 – момент возникновения проводимости в цепи «фаза-земля» кабеля электропитания АД)

Таким образом, с учетом функционирования штатных защитных средств со стороны питающей комплектной трансформаторной подстанции (ТП), создаются предпосылки применения защитного отделения от электрической сети обратного энергетического потока АД и синхронного двустороннего её обесточивания в момент возникновения аварийного состояния, включая даже маловероятное состояние, обусловленное мгновенным возникновением контакта трёх фаз сети на контур «земля». Это даёт основание считать схему контроля, представленную на рисунке 5.2 универсальной.

На основании предложенного принципа выявления повреждения кабеля в силовой цепи присоединения АД, который заключается в формировании кратковременной проводимости конденсаторно-полупроводниковой цепи между фазами сети и контуром «земля», обоснован способ выявления аварийного состояния, характеризуемого мгновенным присоединением трёх фаз к контуру «земля». Ограниченность продолжительности такого присоединения способствует ограничению оперативного тока данного

устройства, поддержанию требуемых параметров электробезопасности и обеспечивается последовательной конденсаторной цепью С5-С6 (Рисунок 5.3) в цепи между фазами сети (в присоединении к АД) и контуром «земля» Концептуальная схема устройства защиты (Рисунок 5.1) дополнена источником напряжения постоянного тока, находящегося в последовательном присоединении с точкой нулевого потенциала цепей подключения к фазам сети и с конденсаторно-полупроводниковой цепью формирования информационного сигнала при передаче импульса постоянного тока на контур «земля».

5.2. Схемная реализация принципа ограничения энергетических параметров обратной ЭДС двухскоростного асинхронного двигателя методом управления параметрами отключенной обмотки статора

Выявленная принципиальная возможность управления электромагнитным состоянием асинхронной машины в процессе подавления обратного энергетического потока на основе закорачивания дополнительной обмотки статора (на интервале выбега) предопределяет размещение соответствующего исполнительного устройства непосредственно в корпусе АД. Эта задача может быть решена применительно к корпусам серийных рудничных двигателей, в которых предусмотрен отсек для установки управляющего (интеллектуального) оборудования, что исключает возможное техническое противоречие.

Опыт эксплуатации рудничных двухскоростных двигателей серии ЭКВФ-315 и ЭКВК 4-220 показывает некорректность размещения отсека кабельных вводов в торцевой части машины на общей панели подшипникового узла (из-за сложности процесса разборки-сборки в ходе ремонта) и целесообразность перемещения этого отсека на продольную поверхность корпуса АД. Это вполне согласуется с концепцией конструкции перспективного двигателя, упомянутого выше и позволяет выполнить

устройство подавления обратного энергетического потока АД как неотъемлемую структурную составляющую двухскоростной асинхронной электрической машины.

Учитывая идентичность управляющих воздействий, схему исполнительного устройства подавления обратного энергетического потока АД рассмотрим на примере реализации в составе двухскоростного двигателя.

В данной схеме (Рисунок 5.5) предусмотрены полупроводниковые короткозамыкатели вводов А1-В1-С1 и А2-В2-С2 статорных обмоток (соответственно, W_1 и W_2) двухскоростного АД. Эти короткозамыкатели выполнены на базе мостовых выпрямителей VC3 и VC4, нагруженных. Соответственно, тиристорами VS1 и VS2. Короткозамыкатели предназначены для кратковременного включения (на интервале существования импульса напряжения на выходе измерительного устройства защиты (Рисунок 5.6) для шунтирования отключенной обмотки статора в момент начала выбега АД.

Выявление состояния обмоток статора осуществляется схемой на основе трансформаторов тока ТА1; ТА2, оптронов VD1; VD2 и реле К1; К2, получаемых питание через выпрямители VC1 и VC2 с параллельным подключением электролитических конденсаторов большой мощности С1; С2.

При работе двигателя напряжения будут иметь место на каждой из статорных обмоток. Однако включенное состояние обмотки характеризуется наличием в ней тока. В результате, соответствующий оптрон VD1 или VD2 включит реле (К1 или К2), которые своими контактами К1.1; К2.1 станут на самоблокировку, контактами К1.2, либо К2.2 подадут напряжение на трансформатор TV1 блока питания (БП) схемы, а контактами К1.2, либо К2.3 подготовят цепь включения полупроводникового короткозамыкателя обмотки статора, соответственно W2 или W1.

Поддержание включенного состояния реле (К1; К2) после отключения напряжения питания на интервале времени, гарантированно перекрывающем интервал выбега АД, обеспечивается параллельно присоединенными электролитическим конденсаторами С1; С2.

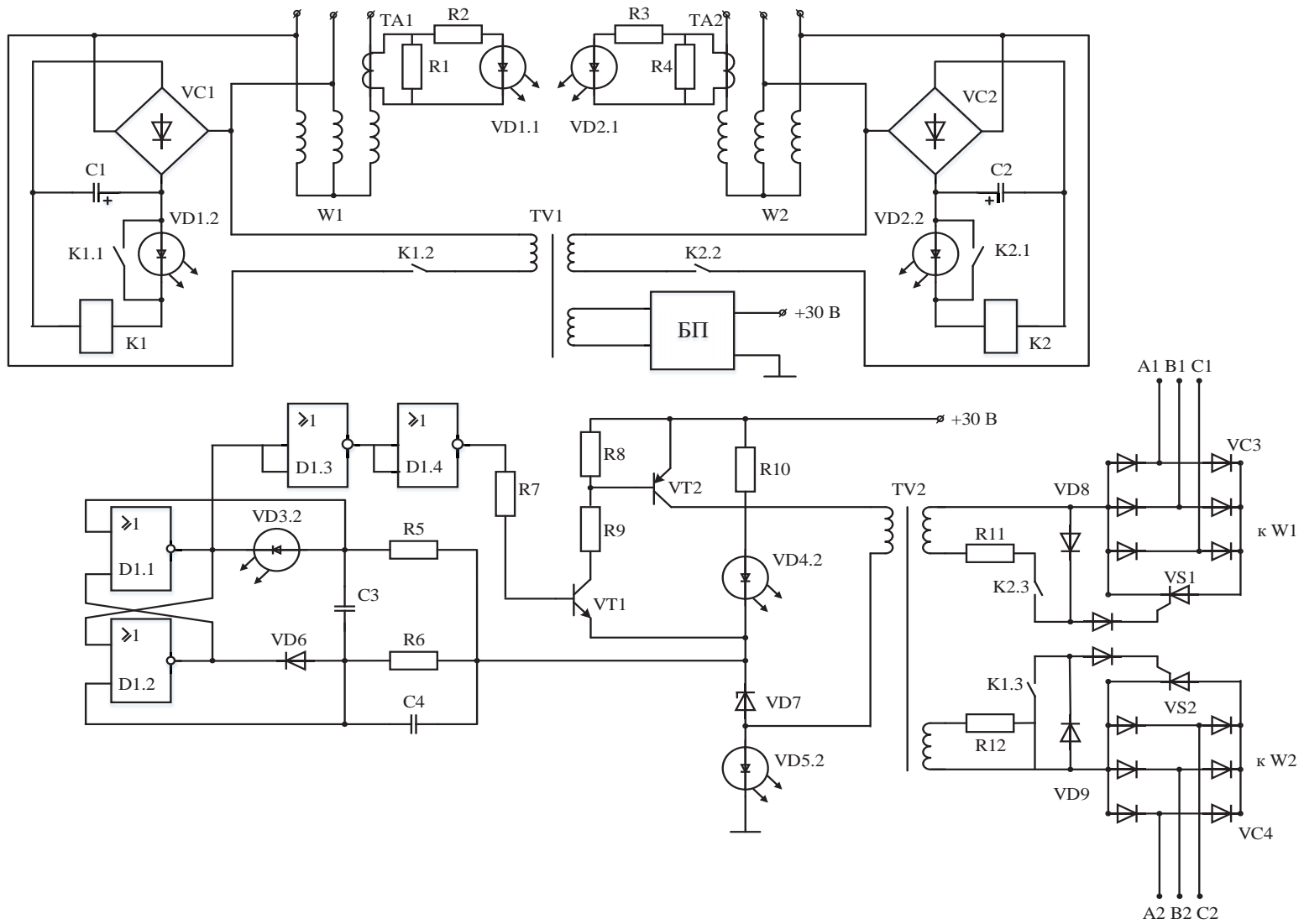


Рисунок 5.5 – Схемная реализация исполнительного устройства управления электромагнитным состоянием асинхронной машины

Включение тиристоров VS1 либо VS2 короткозамыкателей осуществляется пакетом импульсов высокой частоты, формируемых мультивибратором на основе цифровых элементов «ИЛИ-НЕ» D1:1 – D1.2 и усиливаемых составным транзистором VT1-VT2.

Функционирование мультивибратора и цепей развязки (через трансформатор TV2) осуществляется исключительно на интервале существования информационного сигнала на выходе блока выявления аварийного состояния кабеля подключения АД.

Отсутствие импульса в информационном канале схемы обусловит запертое состояние фотодиодов оптронов VD3; VD4; VD5 и нерабочее состояние мультивибратора цепи гальванической развязки (Рисунок 5.5), что обеспечит недопущение ложного срабатывания короткозамыкателей и общую высокую надежность схемы.

5.3 Технические предложения по адаптации устройств индукционно-динамического асинхронного двигателя к реализации функции подавления его обратной ЭДС в процессе защитного отключения

В случае, применения схемы индукционно-динамического торможения АД устраняется возможность воздействия обратной ЭДС АД на кабельную сеть.

Однако в этом случае тиристоры ТРН должны функционировать на всем интервале времени работы АД нагрузки (потребителя), что не согласуется с существующими схемами устройств плавного пуска рудничных электроприводов, где ТРН шунтируется контактором по истечении интервала разгона АД [84, 97]. Решением данного технического противоречия является концепция естественного водяного конвективного охлаждения силового тиристорного модуля в рудничном взрывозащищенном исполнении, реализованная в промышленности (Рисунок 5.6) [98]. В соответствии со схемой теплота от тиристоров 2 передается на контур циркуляции охлаждающей воды, состоящий из теплоприемников 4, камер 3, рукавов 6 и теплорассеивателя 8.

Малые объемы воды в вертикальных каналах теплоприемников 4 вследствие интенсивного нагрева создают условие естественной конвекции воды. В результате, её циркуляция будет обусловлена только тепловым воздействием со стороны тиристоров 2 и не потребует применения насосов и другого дополнительного оборудования. Таким образом, схема ИДТ может быть реализована в структуре устройства плавного пуска электропривода горной машины в случае постоянного использования тиристоров ТРН в течение времени работы электропривода. Однако, в этом случае возможно невыполнение защитной функции (подавления обратной ЭДС АД в случае к.з. в кабеле и обрыве, в связи с этим, силовой или нескольких силовых жил кабеля. В то же время, устройство ИДТ может быть подключено и непосредственно к вводам статора АД. В совокупности с устройством выявления повреждения в кабеле, в этом случае будет обеспечено защитное подавление ЭДС вращения АД после защитного отключения сети.

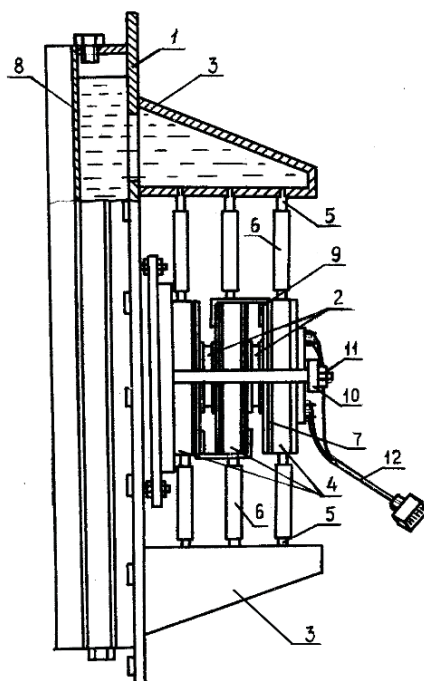


Рисунок 5.6 – Конструктивная компоновка силового тиристорного модуля с конвективной системой водяного охлаждения [98]: 1 – основание модуля охлаждения тиристоров 2; 3 верхняя и нижняя камеры; 4 - теплоприемники с системой внутренних каналов; 5 штуцеры; 6 – гибкие рукава; 7 - теплоотводные электроизоляторы; 8 – теплорассеиватель; 9 – токовые отводы

5.4 Выводы по разделу 5

1. В результате анализа концептуальной схемы автономного устройства выявления повреждения кабеля электропитания асинхронного двигателя выявлено аварийное состояние, на которое не может быть распространена её функция. В частности, эта схема не способна реагировать на мгновенное соединение трех фаз сети с контуром «земля». Несмотря на малую вероятность появления такого аварийного состояния защитная функция должна выполняться и в этом случае. В связи с этим разработана схема автономно-действующего устройства, адаптированного для установки со стороны вводов статора АД и реагирующего на любые варианты аварийных состояний в его силовом присоединении. От устройства-прототипа, предполагаемое техническое решение отличается применением источника напряжения постоянного тока в цепи формирования информационного сигнала, что препятствует возникновению нулевого потенциала в цепи формирования информационного сигнала при любой комбинации соединения фаз с контуром «земля» и повышает надежность работы устройства.

Исследование данной схемы подтвердило возможность формирования информационного сигнала с интенсивно возрастающим передним фронтом, что является основой обеспечения быстродействия в пределах, не более 12 мс реакции устройства на аварийное состояние кабеля.

2. Установлена возможность использования автономно действующего устройства выявления аварийного состояния кабеля как для управления процессом подавления обратного энергетического потока АД, так и для управления процессом защитного отключения напряжения питания электротехнического комплекса, в частности путем воздействия на нулевой или независимый расцепитель автоматического выключателя подстанции.

3. Применительно к реализации процесса подавления обратной ЭДС двухскоростного АД разработана схема автоматического закорачивания его отключенной обмотки в момент защитного отключения сети. Данная схема

адаптирована для непосредственного встраивания в отсек кабельных вводов АД модернизированной конструкции. Данное техническое решение согласуется с концепцией модернизации корпусов двухскоростных двигателей, находящейся в разработке ГУ «НИИВЭ», г. Донецк.

4. Обоснована возможность использования устройств плавного пуска асинхронных электроприводов горных машин, содержащих тиристорные регуляторы напряжения для реализации дополнительно функции подавления обратной ЭДС АД при отключении напряжения сети (выявлении повреждения в кабельной сети). Обоснована целесообразность и возможность неприменения шунтирования ТРН после окончания пуска (разгона) АД потребителя. Разработана упрощённая версия схемы устройства индукционно-динамического торможения АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повсеместное применение в структуре ЭТК участков шахт электрооборудования с АД высокой мощности сопряжено с формированием факторов опасности электротравматизма, обусловленных действием обратных ЭДС после защитного отключения напряжения электропитания. Существующие методы и средства в области обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участков ЭТК реализуют функцию автоматического защитного отключения напряжения и не предусматривают воздействия на параметры обратных ЭДС АД потребителей, переходящих в режим выбега. В связи с этим, научную и практическую актуальность приобретает задача быстродействующего защитного обесточивания шахтного участкового ЭТК на основе подавления обратных ЭДС АД потребителей.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в обеспечении безопасных режимов работы шахтных участковых электрических сетей на основе ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей в процессе отключения путём управления параметрами их обратных ЭДС.

Основные научные и практические результаты работы состоят:

- в совершенствовании методов математического моделирования процессов в ЭТК участка шахты, в частности, методов моделирования процесса воздействия на величину обратной ЭДС управлением электромагнитными параметрами АД, включая специфику электромагнитной системы двухскоростного двигателя, а также применение способа представления АД многообмоточным трансформатором с управляемой коммутацией его электрических и магнитных компонентов;

- обосновании приемлемости применения индукционно-динамического торможения АД как средства предотвращения опасности электропоражения в сети участка шахты после её защитного отключения в связи с возникновением утечки тока на землю;

- в разработке технических решений в области подавления обратных ЭДС АД на интервале выбега в контексте обеспечения безопасного состояний ЭТК участка шахты после защитного отключения напряжения питания;

- усовершенствовано устройство выявления аварийного состояния кабеля электропитания АД в структуре ЭТК участка шахты, функционирующее автономно и отличающееся наличием структуры, обеспечивающей реакцию на одновременный мгновенный контакт трёх фаз сети с контуром «земля».

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВ – автоматический выключатель;

АД – асинхронный двигатель;

АЗ – аппарат защиты;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ГК – гибкий кабель;

КА – коммутационный аппарат;

КМ – контактор магнитный;

МК – магистральный кабель;

П – пускатель;

РП – распределительный пункт;

РУВН – распределительное устройство высокого напряжения;

РУНН – распределительное устройство низкого напряжения;

ТП – трансформаторная подстанция;

УШ – участок шахты;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭП – энергетический поток;

ЭТК – электротехнический комплекс;

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. 25.07.2006 № 258: видання офіційне / Держ. інспек.з нагляду за режимами споживання електричної і теплової енергії (Держенергонагляд). – Харків : Індустрія, 2007. – 272с.
2. Meier, A.V. Electric Power Systems: A Conceptual Introduction / A.V. Meier. – Wiley-IEEE Press, 2006. – 328 p.
3. Saccomanno, F. Electric Power Systems: analysis and Control / F. Saccomanno. – Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.
4. Прогрессивные технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. Часть I. Технологические схемы. – М.: Типография Института горного дела им. А.А. Скочинского, 1978. – 381 с.
5. Озерной, М.И. Переходные процессы в шахтной участковой сети при коммутации асинхронных короткозамкнутых электродвигателей / М.И. Озерной, В.М. Фарович // Горный журнал. – 1969. – №3. – С.136-141.
6. Лейбов, Р.М. Взрывобезопасное реле утечки типа РУВ / Р.М. Лейбов. – М.: Углетехиздат, 1953. – 32 с.
7. Лейбов, Р.М. Утечки в шахтных электрических сетях / Р.М. Лейбов, М.И. Озерной. – М.: Недра, 1972. – 178 с.
8. Лейбов, Р.М. Электрификация подземных горных работ / Р.М. Лейбов. – М.: Углетехиздат, 1952.
9. Электроснабжение угольных шахт / С.А. Волотковский [и др.]. – М.: Недра, 1984. – 376 с.
10. Электрификация горных работ: учебник для вузов / М.М.Белый [и др.]; под ред. Г.Г Пивняка. – М.: Недра, 1992. – 383с.
11. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів. / Г.Г Півняк, [та ін.]; під ред. Г.Г. Півняка. – 2-е вид., доправ. та доп. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 579 с.

12. Дзюбан, В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – Москва: Недра, 1982. – 152 с.
13. Дзюбан, В.С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной ЭДС шахтных электродвигателей / В.С. Дзюбан, Я.С. Риман // Взрывобезопасное электрооборудование. Вып. 6. – М.: Энергия, 1969.
14. Дзюбан, В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
15. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
16. Колосюк, В.П. Повышение взрывопожаробезопасности шахтных систем электроснабжения / В.П. Колосюк, П.К. Жуйков // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 99-116.
17. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
18. Риман, Я.С. Защита шахтных участковых сетей от токов короткого замыкания / Я.С. Риман. – М.: Недра, 1985, – 88 с.
19. Пат. 502446 СССР, Н 02J 3/18. Способ автоматической компенсации емкостных токов утечки в разветвлённых сетях / В.Т. Загороднюк, В.Д. Кочетков, К.Н. Левандовский.– заявл. 20.12.71; опубл. 05.02.76.
20. Пат. 471636 СССР, Н 02h 5/10. Устройство для защиты от коротких замыканий и обрыва фазы / В.Д. Кочетков [и др.]– заявл. 04.07.73; опубл. 25.05.75.
21. Пат. 1144163A SU, Н 02Н 3/17. Устройство для защиты от утечки тока в сети с изолированной нейтралью / В.Д. Кочетков [и др.]– заявл. 05.087.83; опубл. 07.03.85.
22. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита шахтных сетей от замыкания на землю / Н.Ф. Шишкин. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 53 с.
23. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / Є.О. Вареник [та ін.]– під ред. Півняка Г.Г.– Дніпропетровськ: НГУ, 2004. –334 с.

24. Пат. 46748 (UA), МПК (2009), H02J 3/00. Спосіб автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку в трифазних електричних мережах з ізольованою нейтраллю / В.М. Савицький, О.І. Белошистов, О.В. Савицький. – u 2009 04385; заявл. 05.05.2009; опубл 11.01.2010.

25. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.

26. Nelson, J.P. System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety. IEEE Press Series on Power Engineering / J.P. Nelson, P.K. Sen. – Wiley- IEEE Press, 2009. – 500 p.

27. Справочник энергетика угольной шахты : в 2 т. : Т. 2. / Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н и др.; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – 440 с. : ил.

28. Вареник, Е.А. Новая серия взрывозащищённых трансформаторных подстанций ТВПШ / Е.А. Вареник, В.Е. Налбатов, А.В. Савицкий и др. // Уголь Украины.– 2016.– №4-5.– С. 33-39.

29. Справочник по взрывозащищённому электрооборудованию / А.И. Пархоменко [та ін.]; под ред. А.И. Пархоменко.– К.: Техника, 1990. – 198 с.

30. Выключатели автоматические А3790: техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] // АО «Контактор»: завод электротехнической промышленности. – Москва, 2017.– Режим доступа: https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/adl/A3790_TO.pdf.– Загл. с экрана.

31. 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.

32. Сычев, Л.И. Шахтные гибкие кабели / Л.И. Сычев, Л.З. Реут.– М.: Недра, 1971. – 64 с.

33. Левкин, Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. – Макеевка: МакНИИ, 2002.– 392 с.
34. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / А.М. Брюханов [и др.]; под ред. А.М. Брюханова [Часть 1].– Донецк: Донбасс, 2004.– 548 с.
35. Гуляев, Б.В. Взрывозащита и электробезопасность шахтных сетей / Б.В. Гуляев. – Киев-Донецк: Высш. шк., Главное издательство, 1986.– 138 с.
36. Создание взрывобезопасного гибкого кабеля / О.А. Демченко [и др.] // Уголь Украины, 1996. №3.– С. 34-38.
37. Гимоян, Г.Г. Релейная защита подземного электрооборудования и сетей / Г.Г. Гимоян, Р.М. Лейбов. – М.: Недра, 1970. – 281 с.
38. Ковалев, П.Ф. О критериях оценки эффективности мер и средств обеспечения безопасности применения электрооборудования в угольных шахтах / П.Ф. Ковалев, В.П. Коптиков, А.П. Ковалев // Безопасность труда в промышленности. – 1972. – №8. – С.34-36.
39. А.с. 1116500 СССР. Шахтный взрывобезопасный экранированный кабель / П.Ф. Ковалев [и др.] (СССР). – № 116500/7-17; заявл. 07.09.1956; опубл. 01.01.1958. – 2 с.
40. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах : Москва.– Углетехиздат, издание третье, 1959.–595 с.– (Нормативно-правовой акт)
41. Правила безпеки у вугільних шахтах : НПАОП 10.0-1.01-05.-К.: Видавництво «Відлуння»: Держнаглядохоронпраці України, 2005. – 398 с. – (Нормативно-правовий акт з охорони праці).
42. Колосюк, В.П. Опыт эксплуатации электрооборудования, средств защиты и кабелей на напряжение 1140В в угольных шахтах / В.П. Колосюк, В.П. Коптиков, И.Ф. Сумин // Безопасная, экономная и надежная эксплуатация взрывозащищенного электрооборудования. Сборник научных трудов ВНИИВЭ, 1990.– С. 27-33.

43. 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.
44. Шишкин, Н.Ф. Защита шахтных электроустановок и кабельных сетей / Н.Ф. Шишкин, В.П. Олексевич, П.Я. Данилин и др.. Москва: Углетехиздат, 1959.– 43 с.
45. Шишкин, Н.Ф. Проблема комплексной электровзрывобезопасности и задачи научных исследований в области электрификации шахт / Н.Ф. Шишкин.– Москва: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1966.– 48 с.
46. Изыскание новых способов обеспечения безопасного применения электрических установок и сетей в газообильной среде / Н.Ф. Шишкин [и др.] : Министерство угольной промышленности СССР, ВУГИ.– Москва, 1959.– 169 с.– Деп. в ВУГИ 15.12.59, №765.
47. Шумейко, В.И. Назначение гибких экранированных кабелей и методика их испытаний / В.И. Шумейко // Вопросы горной механики.– 1959.– Том 9. С. 193-227.
48. Шумейко, В.И. Техника безопасности в угольной промышленности / В.И. Шумейко, Н.В. Костенко // Москва: Госгортехиздат, 1963.– 317 с.
49. Исследование условий, предупреждающих взрыв рудничного газа при разрыве гибкого кабеля сети 660 В / В.И. Шумейко, Н.В. Костенко // Макеевка, 1967.–52 с. – Деп. в МакНИИ 12.12.67, №55.
50. Анализ конструкции экранированных низковольтных кабелей и разработка технических требований на экранированные кабели системы с опережающим отключением / В.И. Шумейко.– Макеевка, 1963.– 40 с. – Деп. в МакНИИ 09.10.63, №33.
51. Отчет по промышленному внедрению и промышленным испытаниям шахтных кабелей по работам: 10-в, 10-п, 8-п и 7-п. / В.И. Шумейко.– Макеевка, 1958.– 52 с. – Деп. в МакНИИ 07.08.58, №12.

52. Разработать ТЗ на кабели для питания комбайнов на крутых пластах, работающих с кабелеподборщиком / В.Н. Костенко. А.Е. Бондалетов.– Макеевка, 1975.– 74с. – Деп. в МакНИИ 02.16.75, № 579.

53. Шишкин, Н.Ф. Основные направления электрификации современных шахт / Н.Ф. Шишкин, В.Ф. Антонов. – М.: Наука, 1981. – 116 с.

54. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография / К.Н. Маренич. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.

55. Маренич, К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василюк. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 206 с.

56. Маренич, К.Н. Исследование процессов в участковой элеткросети при групповом выбеге асинхронных двигателей / К.Н. Маренич, С.В. Василюк // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2005. – Вип. 74. – С. 30-36.

57. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с.

58. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 125 с.

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

60. Аппараты защиты от токов утечки унифицированные рудничные. Техническое описание: АЗУР.1, АЗУР.2, АЗУР.3 [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://ukrniive.com.ua/ru/research/lowvoltage/azur.htm>. – Загл. с экрана.

61. Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации / ИТЭП.648513.004.РЭ, 2013. – 28 с.

62. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как способ ограничения параметров обратного энергетического потока / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 39–47

63. Дубинка, Е.С. Исследование переходных процессов в элементе сложной электромагнитной системы при искусственном создании токовой перегрузки в контексте создания устройства защиты / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVI междунар. науч.-техн.конф., 25-26 мая 2016 г.: материалы конф. – Донецк, ДонНТУ, 2016. – 341 с.

64. Дубинка, Е.С. Исследование свойств виткового замыкания многообмоточного трансформатора в контексте воздействия на его энергетические характеристики / Е.С. Дубинка // VI междунар. научн.-техн. конф., 22 апреля 2016 г., материалы конф.– Усинск, УФ УГТУ, 2016.– С.66-68.

65. Дубинка, Е.С. Управление процессами в асинхронном двигателе как способ подавления обратного энергетического потока в процессе выбега / Севергеоэкотех-2017: XVIII междунар. молодёжная науч. конф., 12-14 апреля 2017 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2017.– Ч.1.– С. 16-18.

66. Дубинка, Е.С. Анализ технической возможности процесса подавления обратного энергетического потока электрической машины методом воздействия на электромагнитные параметры / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVII междунар. науч.-техн.конф., 24-25 мая 2017 г. : материалы конф. – Донецк, ДонНТУ, 2017. – С. 108-112.

67. Boldea, I., Electric machines: steady state, transients, and design with MATLAB / Ion Boldea, Lucian Nicolea Tutelea. – CRC Press, 2009. – 797 p.

68. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

69. Bosch, P.P.J. Van den Modeling, identification and simulation of dynamical systems / P.P.J. van den Bosch, A.C. van der Klauw. – CRC Press, 1994. – 208 p.

70. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

71. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: "Энергия", 1974. – 840 с.

72. Взрывозащищенные асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика [и др.]; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.

73. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 2001. – 463 с.

74. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов вузов / Л.А. Бессонов. – Москва: Высш. шк., 1996. – 159 с.

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

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

77. Дубинка, Е.С. Принцип моделирования процесса формирования ЭДС отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XV междунар. науч.-техн. конф., 20-22 мая 2015 г.: материалы конф. – Донецк, ДонНТУ, 2015. – С. 65-69.

78. Дубинка, Е.С. Использование конструкции двухскоростного двигателя как базы эксперимента по ускоренному подавлению энергетических потоков / Е.С. Дубинка // Севергеоэкотех-2018: XIX междунар. молодёжная науч. конф., 21-23 марта 2018 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2019. – Ч1. – С. 16-18.

79. Сивокобиленко, В.Ф. Оцінка електробезпеки експлуатації двошвидкісних двигунів у складі дільничних електромереж шахт / В.Ф. Сивокобиленко, Я.О. Ляшок // Наукові праці ДонНТУ, серія електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – №1(17). – С. 5-12.

80. Lipo Thomas A. Dual Stator Winding Induction Machine Drive / Thomas A. Lipo, Alfredo R. Muñoz // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. 36, No. 5, september 2000. – P. 1369-1379.

81. Pienkowski, K. Analysis and Control of Dual Stator Winding Induction Motor // Arch. Electr. – 2012. – Eng. 61. – P.421–438.

82. Маренич, К.Н. Двухскоростной асинхронный двигатель как объект реализации функции защитного подавления обратного энергетического потока [Электронный ресурс] / К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка // Вестник Донецкого национального технического университета.– Донецк: ДонНТУ, 2019.– Вып 3(17). – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/03/marenich.pdf> .– Загл. с экрана.

83. Сивокобиленко, В.Ф. Математичне моделювання перехідних процесів в електротехнічних комплексах шахтних електричних мереж: монографія / В.Ф. Сивокобиленко, С.В. Василець. – Луцьк: Вежа-Друк, 2017.– 272 с.

84. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников / учеб. пособ. для студ. высш. учебн. завед / К.Н. Маренич [и др.]. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 252 с.

85. Дубинка, Е.С. Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ ограничения энергетического воздействия на шахтную электрическую сеть в процессе защитного отключения [Электронный ресурс] / Е.С. Дубинка // Вестник Донецкого национального технического университета.– Донецк: ДонНТУ, 2019.– Вып. 2(16).– Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/02/dubinka.pdf>.– Загл. с экрана.

86. Маренич, К.Н. Эволюция технических решений задачи подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей [Электронный ресурс] / К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка // Вестник Донецкого национального

технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2018.– Вып. 2(12). – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/02/dubinka.pdf>.– Загл. с экрана.

87. Дубинка, Е.С. Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ подавления обратного энергетического потока в случае аварийного отключения сети / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVIII междунар. науч.-техн. конф., 22-24 мая 2018 г.: материалы конф.– Донецк, ДонНТУ, 2018. С. 166-169.

88. Дубинка, Е.С. Анализ технических возможностей подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка, И.В. Ковалёва // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ "НИИВЭ". – Донецк: ООО "Типография Восток Пресс", 2017. – Вып. 1(52).– С.66-72.

89. Контактёр однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактёр серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm> – Загл. с экрана.

90. Дубинка, Е.С. Применение индукционно-динамического торможения как способа подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка // Наука, техника, инновации: IX междунар. науч.-практ. конф., 25 апр. 2019 г., материалы конф.– Усинск, УФ УГТУ, 2019.– С.114-119.

91. Петров Л.П. Автоматическое управление торможением станочных электроприводов / Л.П. Петров, Р. Г. Подзолов, Л.В. Буштян.– Москва, Машиностроение, 1978.– С. 15-20.

92. Пичуев А.В. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, И.Ф. Суворов. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 326 с.

93. Пат. 103735 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00; H02H 3/02 (2006.01). Пристрій визначення стану витоку струму на землю в мережі двошвидкісного

асинхронного двигателя / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – а 2012 14770; заявл. 24.12.2012; опубл. 11.11.2013.

94. Маренич, К.Н. Техническая реализация двустороннего обесточивания мгновенного трехфазного короткого замыкания как способ повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 2 (18). – С. 101-105.

95. Дубинка, Е.С. Автоматическое подавление обратного энергетического потока асинхронного двигателя – комплексное решение задачи защитного обесточивания электросети участка шахты / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XIX междунар. науч.-техн. конф., 21-23 мая 2019 г. материалы конф. – Донецк, ДонНТУ, 2019. – С. 95-98.

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

97. Сидоренко, И.Т. Тиристорный пускозащитный аппарат для привода подземного скребкового конвейера / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич // Уголь Украины.– 1993. – Вып. 5.– С. 21-23.

98. Маренич, К.М. Асинхронний електропривід гірничих машин з тиристорними комутаторами / К.М. Маренич. – Донецьк : ДонДТУ, 1997 – 64 с.



ГУ «НИИВЭ»

Государственное учреждение
 «Научно-исследовательский,
 проектно-конструкторский и технологический
 институт взрывозащищенного
 и рудничного электрооборудования»

ДНР
 83052 г. Донецк
 ул. 50-й Гвардейской дивизии, 17

ИКЮЛ - 00217159
 Р/с - 25315017022083
 Центральный Республиканский Банк
 Донецкой Народной Республики
 Отделение № 0001/73
 Код банка - 400019

Тел.: (062) 382-93-53
 Факс: (062) 382-93-52
 Моб.: (071) 326-83-66
 e-mail: niive@list.ru

№ 1355 от 22.11.2019
 на Ваш _____ от _____

Проректору по научной работе
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный
 технический университет»
 д.т.н., профессору С.В. Борщевскому

Уважаемый Сергей Васильевич!

На Ваш № 01-563/27 от 21.11. 2019 г. сообщаем, что результаты диссертационного исследования аспиранта Дубинки Екатерины Сергеевны «Обеспечение безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей» рассмотрены в нашем институте и признаны актуальными. Подтверждаем целесообразность их использования в НИР, проводимых ГУ «НИИВЭ» при проектировании шахтных силовых коммутационных и пускорегулирующих аппаратов перспективных серий. В частности, научный и практический интерес представляют:

- техническое решение в области выявления аварийного состояния кабеля питания асинхронного двигателя, включая состояние одновременного контакта с контуром «земля» трёх фаз сети (устройство, действующее автономно при подключении со стороны присоединений статора двигателя);

- технические решения в области адаптации устройств индукционно-динамического торможения асинхронных двигателей к реализации функции подавления их обратных ЭДС в процессе защитного отключения сети;

- исследования процессов при управлении электромагнитным состоянием двухскоростных асинхронных двигателей рудничного исполнения.

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

Директор ГУ «НИИВЭ» к.т.н.

Е.А. Вареник

СОГЛАСИЕ
 Учредительский секретарь
 диссертационного совета Д 01-000/2019
 И.А. Бершадский

ГУ «НИИВЭ»



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

29.11.19 № 29-17/16

На № _____

Диссертационный совет Д 01.008.01
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Дубинки Екатерины Сергеевны на тему: «Обеспечение безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 - Охрана труда (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Дубинки Е.С. а именно: принципы построения автономно функционирующих устройств выявления аварийных и опасных состояний кабелей электропитания двигателей технологических установок участка шахты; особенности проявления обратных энергетических потоков в электрических сетях и способы подавления обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей технологического комплекса участка шахты 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
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
докт. техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

Б.В. Гавриленко

Декан факультета компьютерных информационных
технологий и автоматики
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, профессор

В.В. Турупалов

СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01
И.А. Бершадский

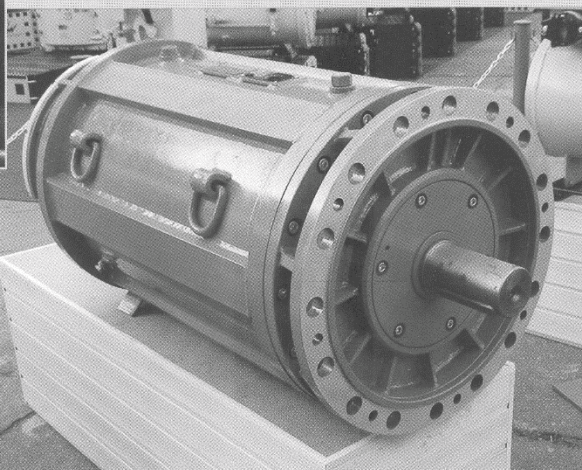
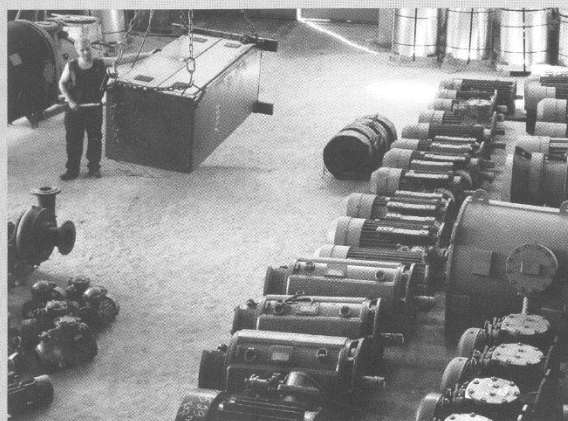


Приложение Б

Таблица Б.1

Технические характеристики двигателей АДВК

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Синхронная частота вращ. об./мин	Номинальный ток, А	КПД, %	Сosφ, о.е	Скольжение, %	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$
АДВК 250S4	110	1500	73	92,1	0,83	1,2	2,7	2,5	6,0
АДВК 250M4	132		88	92,5	0,82	1,1	3,1	2,7	6,4
АДВК250L4	160		106	92,5	0,83	1,3	3,2	3,0	7,2
АДВК 250LA4	200		134	92,0	0,82	1,2	3,4	3,1	7,5
АДВК 250LA6	90	1000	62	92,0	0,80	1,1	2,8	3,0	6,5
АДВК 250LB6	110		80	92,0	0,76	1,0	3,2	3,4	6,9
АДВК 315MA4	160	1500	98	94,2	0,88	0,65	3,1	3,2	8,4
АДВК 315MB4	180		110	94,4	0,88	0,60	3,1	3,2	8,4
АДВК 315LA4	200		118	94,8	0,90	0,65	2,9	2,9	7,9
АДВК 315LB4	250		147	95,0	0,90	0,65	3,1	3,0	8,2
АДВК 315LC4	315		192	94,5	0,88	0,80	3,1	2,9	7,8
АДВК 315LD4	355		216	94,4	0,88	0,80	3,0	2,8	8,0
АДВК 355S4	315		192	94,4	0,88	1,1	3,1	2,8	7,5
АДВК 355M4	355		225	94,2	0,85	1,0	3,2	3,0	8,0
АДВК 315M12/4	45/132	500/1500	51/87	87,0/91,0	0,52/0,85	2,2/1,2	2,5/2,3	-2,4	3,1/6,2
АДВК 315L12/4	55/160		60/107	89,0/91,5	0,52/0,83	2,3/1,0	2,7/2,4	-2,3	3,0/6,3
АДВК 355M12/4	65/200		65/136	84,0/92,0	0,52/0,81	2,0/1,0	2,5/2,6	-2,3	3,0/6,0
АДВК 355LA12/4	85/250		90/158	84,0/92,0	0,57/0,87	2,4/1,5	2,6/1,8	-2,1	2,3/5,3
АДВК 355LB12/4	105/315		118/199	88,1/94,2	0,51/0,85	2,3/1,0	2,6/2,2	-2,1	2,6/5,5
АДВК 355LC12/4	120/360		126/231	85,0/93,0	0,57/0,85	2,5/1,4	2,8/2,2	-2,3	2,5/6,3
АДВК 355LA8/4	125/250	750/1500	95/155	90,0/94,0	0,75/0,88	2,4/1,3	2,8/2,3	-2,5	5,0/7,0
АДВК 355LB8/4	160/315		135/190	0,88/93,5	0,70/0,90	2,5/1,4	2,5/2,1	-2,3	5,5/7,5



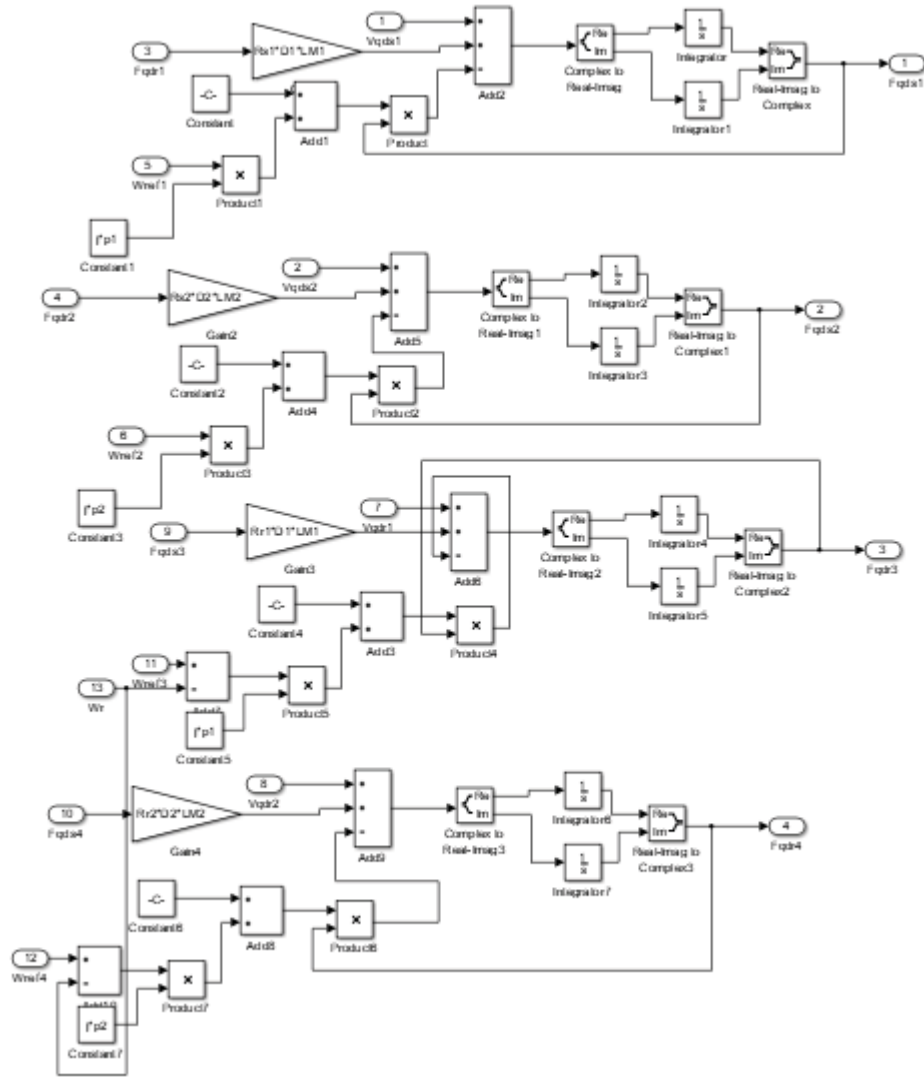


Рисунок В.3 – Структурная схема компьютерной модели статорных и роторной обмоток двухскоростного асинхронного двигателя

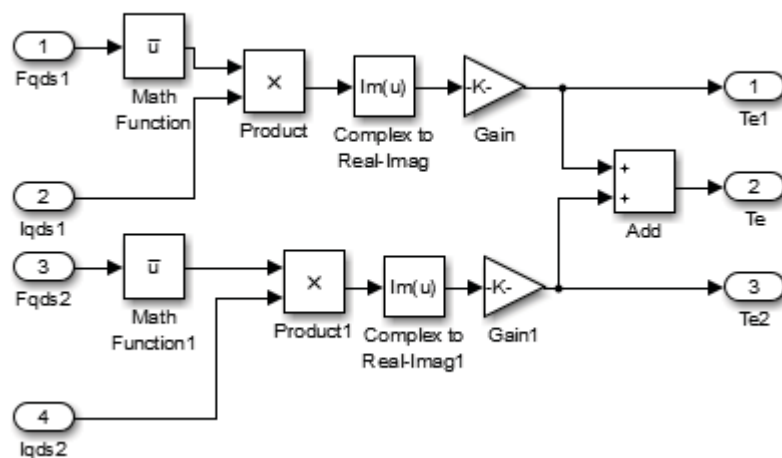


Рисунок В.4 – Структурная схема компьютерной модели электромагнитного момента двухскоростного асинхронного двигателя