

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

*На правах рукописи*

УДК 681.5:621.311

**ДЕРКАЧЁВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ НА  
РЕЗЕРВНОЕ ПИТАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Ткаченко Сергей Николаевич

канд. техн. наук, доцент

Идентичность всех экземпляров

**ПОДТВЕРЖДАЮ**

Учёный секретарь диссертационного

совета Д 01.024.04

канд. техн. наук

Т.В. Завадская

Донецк – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ	
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	13
1.1 Электромеханические комплексы предприятий с непрерывным технологическим циклом как объекты реализации функций управляемого автоматического включения резерва электроснабжения...	13
1.2 Аналитический обзор схемных решений и функциональных особенностей существующих средств автоматического включения резерва электроснабжения предприятий с непрерывным технологическим процессом.....	19
1.2.1 Условия применения, типовые функции и структура устройств АВР в системах электроснабжения.....	19
1.2.2 Диалектика развития способов обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в контексте создания устройств АВР на электромеханической и полупроводниковой базе.....	21
1.2.3 Анализ возможностей микропроцессорной элементной базы в контексте улучшения показателей функциональности средств автоматического включения резерва электроснабжения.....	24
1.3 Методы расчёта переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой.....	30
1.4 Выводы по разделу 1. Цели и задачи исследования .....	34
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, АДАПТИРОВАННЫХ К ИССЛЕДОВАНИЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА	

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ .....	37
2.1 Определение параметров схемы замещения и математическая модель асинхронного двигателя.....	38
2.2 Определение параметров схемы замещения и математическая модель явнополюсного синхронного двигателя .....	49
2.3 Определение параметров схемы замещения и математическая модель неявнополюсного синхронного двигателя .....	56
2.4 Определение параметров схемы замещения и математическая модель силового трансформатора .....	59
2.5 Выводы по разделу 2.....	62
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОМАШИННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АДАПТИРОВАННОЙ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ВКЛЮЧЕНИИ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	64
3.1 Выбор общей системы координат для математической модели системы электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса .....	64
3.2 Обоснование структуры и параметров универсальной схемы замещения элементов сети в переходных режимах и их математические модели .....	65
3.3 Математическая модель устройства БАПР .....	68
3.3.1 Обоснование принципа обработки входных сигналов токов и напряжений .....	68
3.3.2 Разработка математической модели пороговых органов систем измерения тока и напряжения.....	78
3.3.3 Разработка математической модели органа контроля направления мощности.....	80
3.3.4 Разработка математической модели органа измерения угла	

между напряжениями и модели синхронизатора .....	93
3.4 Выводы по разделу 3 .....	96
РАЗДЕЛ 4 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МНОГОМАШИННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	98
4.1 Исходная схема и параметры схем замещения составляющих математической модели .....	98
4.1.1 Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей .....	99
4.1.2 Определение параметров схем замещения явнополюсных синхронных двигателей .....	101
4.2 Анализ переходных процессов в аварийных режимах эксплуатации многомашинных электромеханических комплексов.....	103
4.2.1 Режим потери питания в сети силового присоединения, содержащего двигательную нагрузку .....	103
4.2.2 Исследование процессов в электромеханическом комплексе, обусловленных реализацией функции автоматического включения резерва электроснабжения при возникновении аварийных режимов в сети внешнего электроснабжения.....	110
4.3 Исследование функциональных возможностей БАВР средствами математического моделирования .....	112
4.4 Выводы по разделу 4.....	128
РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	129
5.1 Обоснование структуры физической модели испытательного стенда.....	129
5.2 Разработка микропроцессорного устройства БАВР .....	131



5.2.1 Измерительные органы устройства БАВР .....	133
5.2.2 Блок формирования комплексных значений входного сигнала .....	137
5.2.3 Пороговые органы тока и напряжения .....	139
5.2.4 Блок направленного реле устройства БАВР .....	141
5.2.5 Орган контроля косинуса угла между секциями и определение момента синхронной подачи резервного питания....	143
5.2.6 Блок логической обработки сигналов .....	145
5.2.7 Блок выходных реле .....	149
5.3 Экспериментальное исследование работы устройства БАВР в аварийных режимах .....	150
5.3.1 Разработка программы и методики экспериментальных исследований.....	150
5.3.2 Экспериментальное исследование работы разработанного устройства БАВР в режиме потери питания, вызванного отключением вводного выключателя секции .....	157
5.3.3 Экспериментальное исследование работы разработанного устройства БАВР в режимах коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения.....	160
5.4 Анализ результатов экспериментальных исследований.....	169
5.5 Выводы по разделу 5.....	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	175
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	177
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ А Определение параметров эквивалентных схем замещения..	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Испытательный стенд.....	209
ПРИЛОЖЕНИЕ В Протокол испытаний.....	214
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Документы о внедрении выполненных разработок.....	217

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** Системы электроснабжения с синхронными и асинхронными электродвигателями большой мощности получили широкое распространение на промышленных предприятиях с непрерывным технологическим процессом. К этим системам предъявляются особые требования по обеспечению устойчивой работы при кратковременных нарушениях электроснабжения, что обусловлено необходимостью предотвращения нарушения технологического процесса. В современных системах эта проблема решается за счёт применения быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР). Однако подача резервного питания на электродвигатели может привести к возникновению недопустимых уровней токов и моментов в двигателях. Так, например, в случае несинхронной подачи резервного питания ток в обмотках статоров двигателей превышает номинальные токи в 15–20 раз, что эквивалентно по своему воздействию на изоляцию нескольким тысячам пусков двигателя, а электромагнитный момент, превышающий номинальные значения в 10–15 раз, являются недопустимыми для ряда механизмов которые не допускают в режиме своей работы значительных ускорений. Поэтому подача резервного питания в таких системах электроснабжения должна осуществляться с контролем угла между напряжениями секций основного и резервного источников питания. Таким образом, реализация этого условия и разработка алгоритмов работы пусковых устройств, выявляющих нарушения электроснабжения во внешней сети электроснабжения, требуют обоснования структуры и параметров устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки.

В связи с этим совершенствование методов и устройств системы автоматического переключения питания на резервный источник электроснабжения потребителей с электродвигательной нагрузкой и непрерывным технологическим процессом является **актуальной** научно-прикладной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам поведения электродвигателей в режимах работы устройств автоматического включения резервного питания посвящено большое количество трудов. Так в работах М. И. Слодаржа, И. А. Сыромятникова и С. И. Гамазина исследованы режимы поведения двигателей при потере питания и действии устройств автоматического включения резерва (АВР). В работах М. А. Шабада, А. В. Беляева, Б. Н. Барзама, отражены исследования в области особенностей выполнения устройств АВР для подстанций с электродвигателями. Работы Д. Т. Гумирова, В. А. Жукова, и В. Ф. Сивокобыленко посвящены вопросам повышения эффективности работы устройств БАВР. Однако не решенным остается вопрос обоснования структуры и параметров устройства автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки.

**Цель и задачи исследований.** Цель работы состоит в обосновании способов модификации устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки путем устранения ресурсоснижающего фактора динамической перегрузки технологических электромеханических устройств.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор исследований в области управления динамическими режимами электромеханических устройств при управлении параметрами их электропитания и обоснование направления научных исследований.
2. Разработка математической модели системы электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса, содержащего асинхронные и синхронные двигатели средней и большой мощности, адаптированной к анализу переходных процессов, обусловленных кратковременными нарушениями электроснабжения потребителей и позволяющей учитывать взаимное влияние энергетических потоков, генерируемых электрическими машинами.
3. Обоснование предельных электромеханических параметров объекта управления и критериев реализации управляющих воздействий применительно к

процессу переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения.

4. Математическое моделирование и анализ режимов работы многомашинного электромеханического комплекса с асинхронными и синхронными электродвигателями при использовании различных вариантов реализации устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР).

5. Обоснование приемлемого принципа функционирования пускового органа БАВР и его техническая реализация.

6. Экспериментальные исследования процесса автоматического включения резерва электроснабжения технологических установок, обоснованного методами математического моделирования, анализ и обобщение экспериментальных данных и установление адекватности теоретических исследований результатам эксперимента.

7. Техническая реализация и внедрение результатов диссертационных исследований.

**Объект исследования.** Процессы в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой в режимах быстрых автоматических переключений питания с рабочего на резервное при возникновении аварийных ситуаций.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы работы устройств автоматического переключения питания двигательной нагрузки в системах электроснабжения.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработан способ определения в темпе реального процесса параметров аналитической зависимости от времени угла сдвига фаз между напряжениями секций при нарушениях электроснабжения, что позволяет обеспечить синфазное подключение резервного питания с помощью разработанного устройства БАВР.

2. Получила дальнейшее развитие математическая модель для анализа переходных процессов в системах электроснабжения с синхронными и

асинхронными электродвигателями, основанная на полных дифференциальных уравнениях всех элементов сети, которая отличается учетом эффекта вытеснения токов в роторных контурах двигателей, способом учета взаимного влияния двигателей в переходных режимах и возможностью учета различных принципов построения пусковых и логических органов устройств быстродействующего АВР.

3. Впервые для определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов от трансформаторов тока (напряжения) предложен метод эквивалентных синусоид, в котором с целью повышения быстродействия на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты находят амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды путем интегрального усреднения заданного количества мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных.

4. Обоснован принцип совершенствования пускового органа направления мощности, предусматривающий определение угла сдвига фаз между током и опорным напряжением в каждом цикле измерений, в котором вместо опорного суммарного напряжения рабочего и резервного источников питания в текущем цикле измерений, используется напряжение рабочего источника из добавленного органа памяти доаварийного цикла измерений, что позволяет обеспечить успешную работу БАВР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии закономерностей протекания переходных процессов в двигательной нагрузке при нарушениях нормального режима электроснабжения, и их использовании для совершенствования методов, алгоритмов и устройств системы автоматического переключения на резервное питание двигательной нагрузки.

Практическое значение результатов исследований.

1. Разработаны математические модели многомашинных систем с двигательной нагрузкой, пригодные к исследованию сложных многомашинных электромеханических систем в динамических режимах их электроснабжения.

2. Определены условия, исключаящие несинхронную подачу резервного напряжения на двигатели от резервного источника питания в процессе автоматического включения резерва.

3. Разработаны алгоритмы работы и создано микропроцессорное устройство БАВР, адаптированное к широкому спектру структур многомашинных электромеханических комплексов.

4. Приведены рекомендации по применению быстродействующих устройств АВР в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой.

**Методология и методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались законы электротехники и методы решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений, теория электрических машин и релейной защиты электрических систем. Теоретические исследования в работе проводились с помощью методов математического моделирования, а практические с использованием методов физического эксперимента.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснованы математические модели многомашинных систем электроснабжения с двигательной нагрузкой для анализа переходных процессов, полученные на их базе закономерности протекания переходных процессов позволяют установить поведение асинхронных и синхронных двигателей в режимах аварийной потери рабочего питания и переключения на резервный источник питания.

2. Разработаны способы включения резервного питания, в которых осуществляется учёт времени работы выключателей и контроль угла рассогласования между векторами напряжений основного и резервного источников питания, что позволяет обеспечить успешный самозапуск двигателей и снизить уровни токов до допустимых значений при потере питания от основного источника.

3. Новые принципы построения микропроцессорных устройств БАВР на основе разработанного метода эквивалентных синусоид, позволяющего определить ортогональные составляющие измеряемых токов и напряжений, что

обеспечивает повышение быстродействия, а также метод реализации органа контроля направления мощности, дополненный функцией памяти дискретных измерений напряжения, что обеспечивает функциональность устройства БАВР при глубоких посадках напряжения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования и лабораторными испытаниями опытного образца микропроцессорного устройства БАВР.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в частности: п.3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП)»; п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; п. 6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: VI Международная научно-техническая конференция «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем – 2013 (КРЕС –2013)», г. Донецк, 2013 г., XVI Международная научно-техническая конференция «Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика» г. Кременчуг, 2015 г., III Международная научно-техническая конференция «Оптимальное управление электроустановками ОКУ’15», г. Винница, 2015 г., Международная научно-техническая конференция «Информатика, управляющие системы,

математическое и компьютерное моделирование 2019», г. Донецк, 2019г., IV международная научно-практическая конференция «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем», г. Донецк, 2019 г.

**Личный вклад автора.** Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, разработке испытательного стенда и опытного образца.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 15 работах, в том числе 1 из них в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 2 – в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в Российской Федерации, 7 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, 2 – в материалах и тезисах конференций, 2 патента на полезную модель, 1 монография.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 105 наименований. Работа изложена на 218 страницах, на которых приведены 33 таблицы, 99 рисунков, 4 приложения.



## РАЗДЕЛ 1

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ:  
АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ. ЦЕЛЬ И  
ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Электромеханические комплексы предприятий с непрерывным технологическим циклом как объекты реализации функций управляемого автоматического включения резерва электроснабжения

Наиболее распространёнными приёмниками электрической энергии в современных энергосистемах являются, используемые практически на всех промышленных предприятиях, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели. В зависимости от особенностей технологического процесса предприятий в их системах электроснабжения применяют: синхронные электродвигатели напряжением 6–10 кВ единичной мощностью от 0.25 до 30 МВт (компрессорные и насосные станции газо- и нефтепроводов); асинхронные электродвигатели напряжением 6–10 кВ единичной мощностью от 200 до 8000 кВт (собственные нужды тепловых и атомных электростанций, металлургические и химические заводы и др.), а также асинхронные двигатели напряжением 0.4 кВ единичной мощностью до 200 кВт и статическую нагрузку (освещение, преобразователи и др.).

Использование асинхронных и синхронных двигателей на предприятиях с непрерывным технологическим процессом предъявляет ряд особых требований к построению схем питания двигательной нагрузки с целью обеспечения бесперебойности электроснабжения и надежной работы [1–3] как в стационарных, так и в переходных режимах работы [4]. В частности, предприятия с непрерывным технологическим процессом относятся к потребителям первой категории и для повышения надежности их электроснабжения должны быть предусмотрены не менее двух источников питания, при этом при выходе из строя

одного из них и автоматическом переключении питания на другой должна быть сохранена непрерывность технологического процесса и восстановлен нормальный режим работы всех основных механизмов в послеаварийном режиме [1, 5].

Наиболее распространёнными нарушениями нормального режима питания в системах электроснабжения являются кратковременные снижения или исчезновения питающего напряжения на зажимах электродвигателей, вызванные короткими замыканиями или потерей питания во внешней сети электроснабжения. Практически любые виды нарушения нормального режима электропитания ведут к изменению режимов работы двигательной нагрузки и могут привести к потере её устойчивой работы, если за время нарушения питания произойдет значительное изменение рабочих характеристик электроприводов [6].

Построение схем электроснабжения промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом должно производиться таким образом, чтобы при кратковременных нарушениях электроснабжения обеспечивалось восстановление доаварийного режима работы всех электродвигателей, подключенных к общим шинам, т.е. обеспечивался бы их успешный групповой самозапуск. Условия группового самозапуска электродвигателей значительно отличаются от условий нормального пуска каждого из них. Групповой самозапуск происходит одновременно для всех двигателей, которые подключены к источнику питания, при этом из-за пониженного напряжения и загрузки механизмов увеличивается длительность разгона, повышается температура нагрева обмоток [7, 8]. Режиму группового самозапуска двигателей предшествует перерыв питания, обусловленный срабатыванием устройств обесточивания цепи короткого замыкания или потери питания, вызванные другими причинами. При потере питания электродвигатели, замедляя скорость вращения, переходят в режим группового выбега, создавая при этом остаточное напряжение на общих шинах, затухающее по величине и частоте. Как показывают исследования [9, 10] в случае несинхронного включения резервного источника питания ток в обмотках статоров электродвигателей превышает номинальные токи в 15–20 раз. Так, например, одно повторное несинхронное включение питания электродвигателя по своему

воздействию на изоляцию эквивалентно нескольким тысячам пусков двигателя на холостом ходу. [9], что существенно сокращает ресурс работы электродвигателя и как следствие приводит к его выходу из строя и нарушению сложного непрерывного технологического процесса. Возникающие электромагнитные моменты в двигателях в режимах несинхронного включения резервного питания, превышающие номинальные значения в 10–15 раз, недопустимы для ряда механизмов, которые не допускают в режиме своей работы значительных ускорений [11]. К таким механизмам относятся приводы с гибкими связями, мощные насосные установки, поршневые компрессоры, агрегаты высокого давления, допустимый момент которых превышает номинальный не более чем в 2–3 раза [10, 11].

В связи с этим применение электродвигателей большой единичной мощности в качестве привода основных механизмов требует комплексного подхода к решению вопросов обеспечения самозапуска и устойчивой работы при кратковременных нарушениях электроснабжения, к определению токов подпитки двигателями места короткого замыкания, к ограничению токов самозапуска и токов короткого замыкания [8, 12].

Наиболее эффективным способом обеспечения бесперебойного электроснабжения двигательной нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения является применение быстродействующих устройств релейной защиты и автоматического переключения питания на резервный источник, позволяющие сократить время перерыва питания и предотвратить нарушение устойчивой работы двигательной нагрузки. В последние годы уровень развития вычислительной и микропроцессорной техники, а также создание высоковольтных коммутационных аппаратов со временем включения порядка 2-3 периода промышленной частоты позволили создать быстродействующие устройства АВР (БАВР), применение которых позволяет существенно сократить общее время перерыва питания, обеспечить синфазную подачу резервного питания, осуществить успешный самозапуск двигателей.

Особого подхода к обеспечению надежности электроснабжения требуют предприятия со сложным непрерывным технологическим процессом, системы электроснабжения которых содержат большое количество синхронных и асинхронных электродвигателей с взаимным влиянием друг на друга в переходных режимах. В качестве примера на рисунке 1.1 приведена типовая схема питания системы собственных нужд тепловой электростанции.

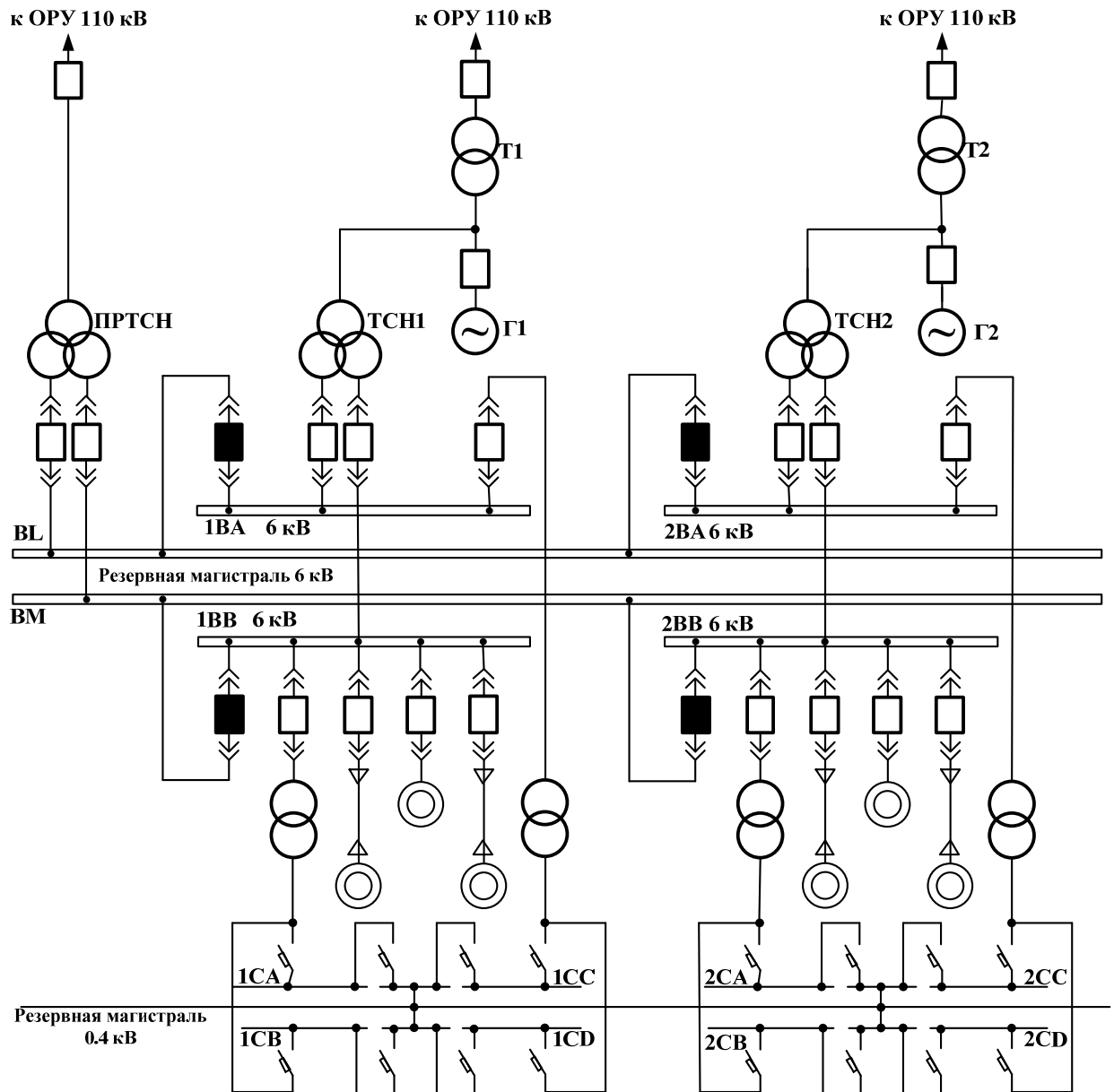


Рисунок 1.1 – Схема электроснабжения системы собственных нужд тепловой электростанции

В этой схеме в качестве рабочего и резервного источников питания применяются трансформаторы с расщепленными обмотками низшего напряжения. Мощность этих трансформаторов, как правило, составляет 25 – 40 МВА, а количество асинхронных и синхронных электродвигателей единичной мощностью от 200 до 8000 кВт, одновременно подключенных к секциям рабочего питания, может достигать 15–20. Кроме этого, количество подключенных к секции трансформаторов 6/0,4 кВ мощностью 630–1000 кВА может составлять порядка 8–12. Синхронные двигатели единичной мощностью 1600–2000 кВт используются в качестве привода углеразмольных шаровых барабанных мельниц. Шины распределительного устройства собственных нужд состоят из двух секций на напряжения 6 и 0,4 кВ (Рисунок 1.1).

Электроснабжение каждой из секций напряжением 6 кВ осуществляется не менее, чем от двух питающих источников. В качестве основного источника питания используются специальные (рабочие) трансформаторы собственных нужд (ТСН1, ТСН2), подключенные к шинопроводу, соединяющему генератор и блочный трансформатор [13].

В нормальном режиме работы система собственных нужд получает питание от рабочих трансформаторов собственных нужд (ТСН 1 и ТСН 2), а в аварийном режиме питание переводится на резервный (ПРТСН) путем включения выключателей между секциями основного и резервного источников питания.

Для промышленных предприятий наиболее широкое применение получила схема электроснабжения двигательной нагрузки от двух понижающих трансформаторов, подключенных отпайками к двум параллельным линиям связи напряжением 110 – 330 кВ (Рисунок 1.2). В нормальном режиме каждая секция получает питание от своего питающего трансформатора, а в аварийном режиме питание на секции, потерявшей питание, восстанавливается путем включения секционного выключателя. В этих режимах допускается перегрузка трансформаторов не более, чем на 40% и кроме того, должен обеспечиваться успешный групповой самозапуск двигателей, что требует минимизации времени перерыва питания за счет применения БАПР.

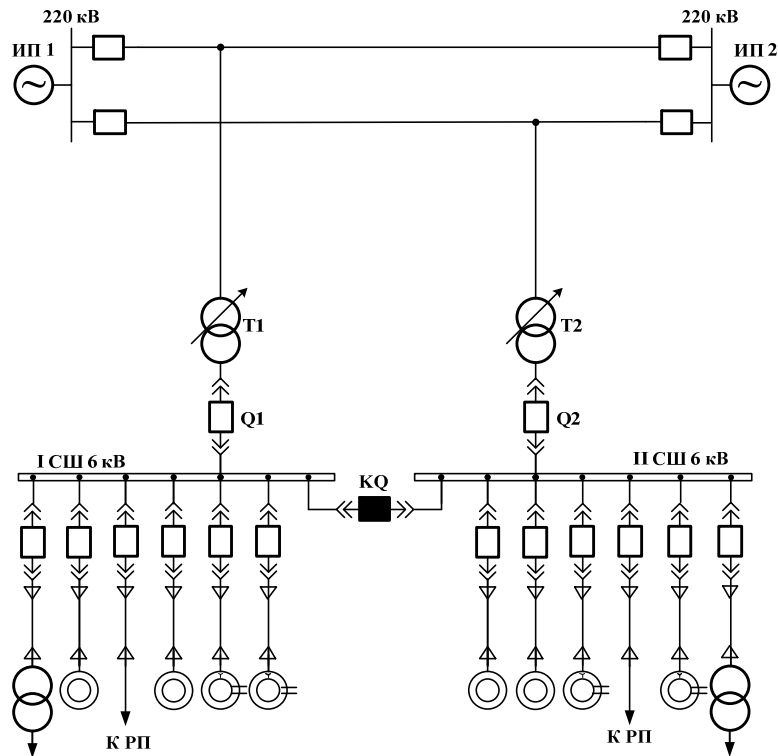


Рисунок 1.2 – Схема электроснабжения промышленного предприятия

Особого внимания требуют системы электроснабжения промышленных компрессорных станций для газо- и нефтепроводов, которые являются достаточно энергоемкими потребителями электрической энергии, поскольку на них может устанавливаться до 16 компрессоров [14]. Приводом таких компрессоров, как правило, служат синхронные электродвигатели напряжением 6–10 кВ с единичной мощностью 6.3-12.5 МВт каждый, поэтому установленная мощность двигательной нагрузки на таких подстанциях может достигать 200 МВт и более.

Кратковременное нарушение нормального режима работы в приведенных схемах электроснабжения наиболее сильно оказывает влияние именно на двигательную нагрузку, так как может привести к нарушению сложного технологического процесса и значительному ущербу. Так, например, к кратковременным нарушениям нормального режима электроснабжения чувствительны газо- и нефтеперекачивающие предприятия, поскольку нарушение нормального режима электроснабжения на таких предприятиях может привести к остановке или ложному срабатыванию электрооборудования, чувствительного к перепадам напряжения на указанных предприятиях, а как следствие к

экономическому ущербу [15]. В таблице 1.1 приведены данные ущерба для нефтедобывающих предприятий по недобору нефти, обусловленные кратковременными нарушениями нормального режима электроснабжения в системе собственного электроснабжения в течение года [16].

Таблица 1.1 – Статистика недоборов нефти, обусловленная кратковременными нарушениями электроснабжения в системе собственного электроснабжения

Предприятие	Нарушения электроснабжения (случаев)	Недобор нефти, тонн	Стоимость потерь, у.е.
ОАО НК «РуссНефть»	228	696	20880
ОАО НГК «СлавНефть»	192	1864	55920
ОАО АНК «Башнефть»	163	710	21300
ОАО «Татнефть»	3	138	4140
ОАО «ТНК ВР»	784	15751	472530
ОАО «Газпромнефть»	474	9173	275190
ОАО «НК Роснефть»	2236	24047	721410
ОАО «Лукойл»	1343	71927	2157810
Итого:	5420	124167	26820072

Таким образом, электромеханические комплексы предприятий с непрерывным технологическим процессом, которые в качестве привода исполнительных механизмов используют мощные синхронные и асинхронные электродвигатели, являются объектами применения научно обоснованных технических решений в области управляемого автоматического включения резерва электроснабжения.

1.2 Аналитический обзор схемных решений и функциональных особенностей существующих средств автоматического включения резерва электроснабжения предприятий с непрерывным технологическим процессом

1.2.1 Условия применения, типовые функции и структура устройств АВР в системах электроснабжения

Наиболее частыми причинами нарушениями нормального режима электроснабжения узлов энергосистемы с двигательной нагрузкой являются

короткие замыкания или потеря питания, вызванная нештатным отключением питающей линии, что составляет порядка 40-50% всех нарушений [17]. В связи с этим, на подстанциях с асинхронными и синхронными электродвигателями должны быть предусмотрены устройства автоматического управления переключением на резервный источник питания многомашинного электромеханического комплекса для обеспечения самозапуска двигателей, с целью сохранения сложного технологического процесса. Для достижения этой цели при коротких замыканиях в сети 6 кВ собственные защиты отходящих присоединений должны отключать поврежденные присоединения с максимальным быстродействием. При коротких замыканиях в питающей сети эта задача может также возлагаться на устройства АВР, которые должны отключить выключатель рабочего питания и включить резервный трансформатор (Рисунок 1.1) или секционный выключатель (Рисунок 1.2).

Принцип действия устройств АВР на распределительных подстанциях без двигательной нагрузки основан на применении пускового органа минимального напряжения [18] или так называемого «быстрого» АВР, когда включение секционного выключателя происходит сразу после самопроизвольного отключения вводного выключателя или его отключения защитами питающего трансформатора [19].

Наличие двигательной нагрузки в схемах электроснабжения может увеличить время действия устройств АВР, поскольку двигатели переменного тока при потере питания переходят в генераторный режим и, вращаясь с остаточной скоростью, поддерживают достаточно высокий уровень напряжения на секции, потерявшей питание. В этом случае орган минимального напряжения сразу не срабатывает, АВР затягивается [20], и за время цикла АВР синхронные электродвигатели выпадают из синхронизма по отношению к резервному источнику питания [21], что приводит к их несинхронному включению. С целью предотвращения несинхронного включения двигательной нагрузки требуется запрет на включение резервного питания до снижения остаточного напряжения на секции до 0.25–0.4 номинального [22].



Применение пускового органа минимального напряжения в устройствах АВР для узлов энергосистемы с двигательной нагрузкой не является эффективным из-за большого времени переключения. Поэтому с целью повышения быстродействия устройств АВР для выявления потери питания используют схемы АВР с комбинированными пусковыми органами.

### 1.2.2 Диалектика развития способов обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в контексте создания устройств АВР на электромеханической и полупроводниковой базе

Наличие в системе электроснабжения электродвигателей способно затянуть время действие устройства «классического» АВР, реагирующего на уровень напряжения, поскольку синхронные двигатели после отключения питания продолжают вращение по инерции и генерируют на шинах напряжение, которое в течение нескольких секунд находится на достаточно высоком уровне. Для сокращения времени выявления потери питания были разработаны подходы, в которых помимо контроля уровня напряжения на секции выполняется контроль частоты питающего напряжения [23] или частоты питающего напряжения и углового сдвига по фазе между напряжениями основного и резервного источников питания [24–26], поскольку они изменяются с большей скоростью, чем уровень напряжения. Схема реализации указанных подходов в устройствах АВР на электромеханической элементной базе представлена на рисунке 1.3.

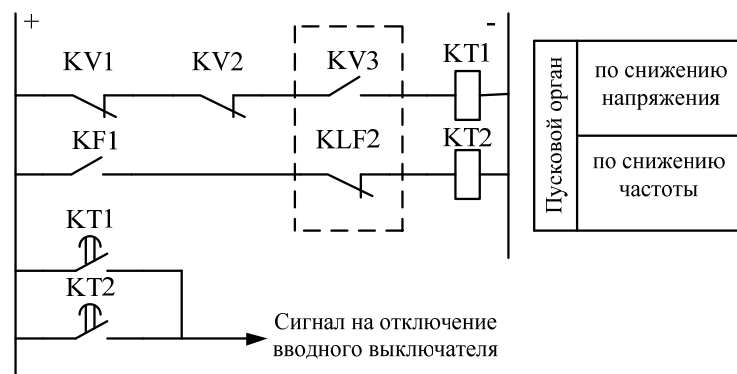


Рисунок 1.3 – Схема пускового органа устройства АВР с контролем частоты питающего напряжения

Описанные подходы способны выявить потерю питания через 0.3– 0.5 секунды [20]. Однако, применение устройств АВР, реализованных с помощью описанных подходов, в системах электроснабжения с мощными электродвигателями не исключает возможной несинхронной подачи резервного электропитания из-за отсутствия контроля величины угла между напряжениями основного и резервного источников питания.

С целью предотвращения излишних срабатываний в устройстве АВР [27] для схем электроснабжения с двигательной нагрузкой реализован подход, в котором в качестве контролируемого параметра сети для выявления потери питания предлагается использовать контроль направления активной мощности на вводе секции. Схема АВР, основанная на контроле направления активной мощности, на вводе секции с помощью электромеханических реле отличается от схемы устройства АВР с пусковым органом по снижению частоты (Рисунок 1.3) тем, что в ней вместо реле частоты используется реле направления мощности. Тем не менее, в приведенном подходе в случае исчезновения напряжения на секции основного источника питания направление активной мощности на вводе секции может не изменяться из-за потребления мощности, генерируемой двигателями соседней подстанции, которая получает питания от той же линии электропередачи.

Для подстанций с нагрузкой в виде синхронных электродвигателей для обеспечения бесперебойного питания электродвигателей разработан подход, основанный на измерении разности фактически потребляемой двигателями активной мощности и мощности, необходимой для их устойчивой работы при нарушениях нормального режима электроснабжения. Приведенный подход технически реализован в устройстве АВР, которое подробно описано в [28]. Условием переключения на резервный источник при таком подходе является превышение полученным интегральным значением разности заданного значения. Недостатком такого подхода является его низкое быстродействие, поскольку необходимо определение за большой промежуток времени фактически потребляемой активной мощности.

С целью повышения чувствительности к появлению аварийных режимов в сети внешнего известен подход, в котором измеряется напряжение на секциях основного и резервного источников питания, контролируется угол между напряжениями взаиморезервируемых секций, выполняется контроль направления активной мощности на вводе секции и дополнительно, а также определяется реактивная составляющая тока прямой последовательности и напряжение обратной последовательности [29]. Недостатком такого подхода является невозможность обнаружения несимметричных коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения, поскольку в этих режимах направление активной мощности не меняет своего направления и продолжается ее потребления электродвигателями.

Известен подход к формированию пускового устройства аналогового синхронного быстродействующего автоматического ввода резерва [30], в котором два измерительных органа напряжений предлагается подключить на разность напряжений разноименных фаз основного и резервного источников питания, а третий измерительный орган напряжения подключить на разность одноименных фаз напряжений основного и резервного источников питания. Такой подход позволяет выполнить резервную подачу напряжения с контролем угла между напряжениями основного и резервного источников питания. Реализация описанного подхода может быть выполнена как на серийно выпускаемых электромагнитных реле (Рисунок 1.4), так и на полупроводниковой элементной базе. Тем не менее, приведенный подход обладает недостаточным быстродействием по сравнению с современными микропроцессорными аналогами, что вызвано использованием морально устаревшей элементной базой.

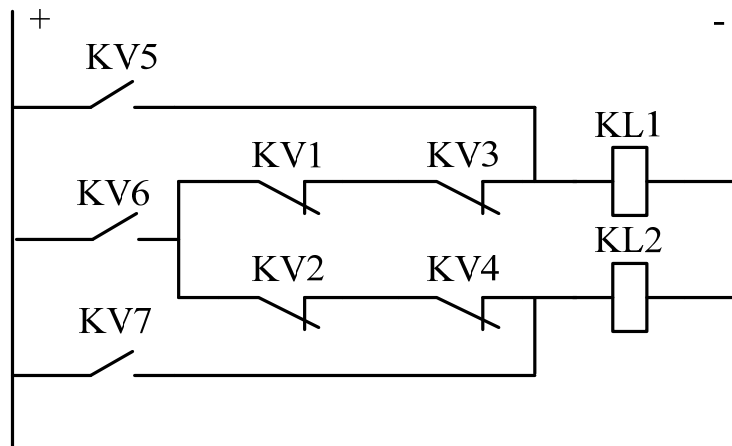


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема пускового устройства на электромеханической элементной базе

Приведенные подходы, реализованные в устройствах АВР [23–32] не обеспечивают бесперебойного электроснабжения электродвигателей приводов ответственных механизмов многомашинных электромеханических комплексов, так как собственное время работы таких устройств АВР составляет порядка 0.4 – 0.5 с, а общий перерыв питания может составлять более одной секунды [33]. Такой перерыв в питании может привести к нарушению непрерывности технологического процесса, к возникновению гидравлических ударов, выпадению из синхронизма синхронных электродвигателей и опрокидыванию асинхронных электродвигателей, отключению контакторов в сети 0.4 кВ. нарушению работы частотно регулируемых приводов [34, 35].

1.2.3 Анализ возможностей микропроцессорной элементной базы в контексте улучшения показателей функциональности средств автоматического включения резерва электроснабжения

В последние годы, благодаря созданию быстродействующих коммутационных аппаратов на напряжение 6–10 кВ и развитию микропроцессорной техники были разработаны новые подходы к автоматическому управлению переключением на резервный источник питания электродвигателей многомашинных электромеханических комплексов, которые позволили в

значительной мере сократить время переключения на резервный источник питания (за время менее 100-200 мс) и тем самым обеспечить сохранение устойчивой работы электродвигателей [36–38]. Такая максимизация быстродействия АВР при питании мощной двигательной нагрузки связана со стремлением обеспечить более легкие условия переходного процесса после восстановления питания. Это связано с тем, что чем меньше будет длительность бестоковой паузы, тем меньше будет снижение частоты вращения двигателей, выше остаточное напряжение и меньший ток включения [39].

Один из разработанных подходов для повышения быстродействия автоматического переключения на резервное питание заключается в контроле токов на вводе секций основного и резервного источников питания, напряжения на секциях основного и резервного источников питания, а также угла между напряжениями взаиморезервируемых секций. В качестве пусковых органов предлагается использовать контроль уровня напряжений на секциях и угла между ними, а качестве блокирующего органа для организации правильной работы предлагается использовать контроль уровня тока на вводе секции. Описанный подход нашел свою реализацию в устройстве автоматического переключателя секций шин (АПСШ), описанного в [40]. Известна модификация приведенного подхода известно решение, в котором с целью повышения быстродействия, в котором в качестве коммутационного оборудования тиристорного ключа на напряжение 6–10 кВ, подключенного параллельно секционному выключателю [41]. К недостаткам приведенного подхода и его модификации относится необходимость установки трансформаторов напряжения на каждой из сторон вводного выключателя секции шин с целью подтверждения правильности определения места короткого замыкания.

Для организации переключения на резервный источник питания с контролем угла между напряжениями секций основного и резервного источников питания известен подход, реализованный в микропроцессорном терминале SUE 3000 [42, 43]. Принципиальная схема подключения микропроцессорного устройства SUE 3000 показана на рисунке 1.5.

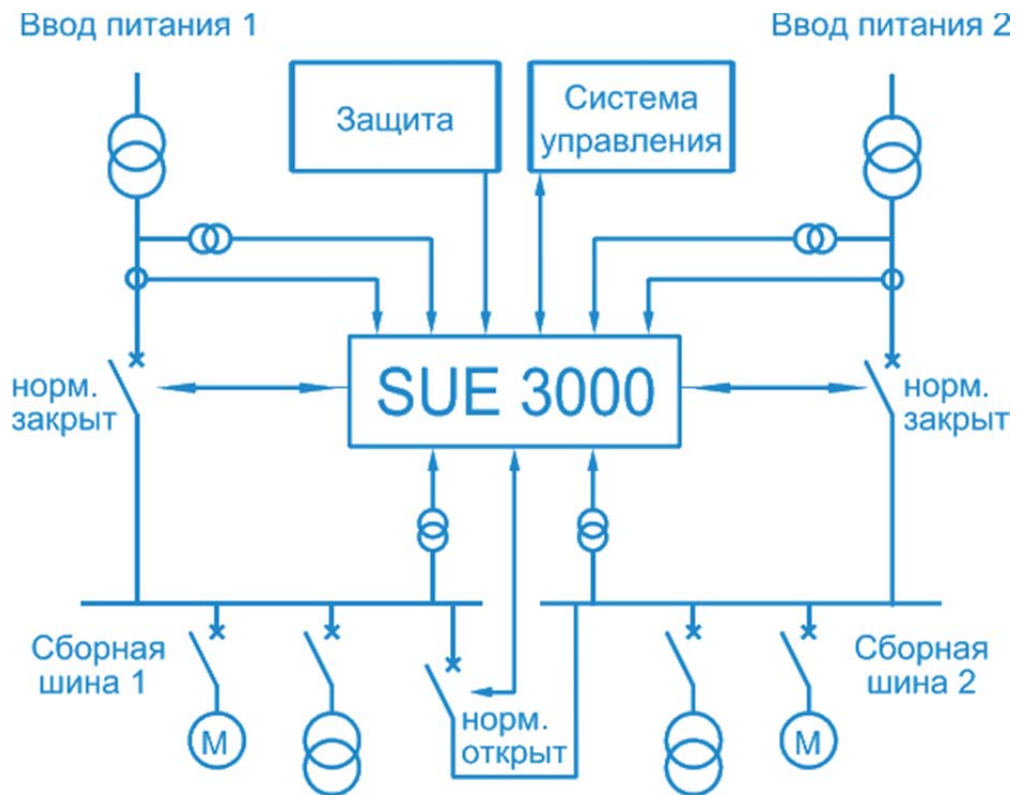


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема подключения микропроцессорного устройства SUE 3000 [42, 43]

Данный подход предусматривает четыре режима переключения на резервный источник питания в случае исчезновения питания от основного источника питания [44]: быстрое (мгновенное) переключение, переключение при первом совпадении фаз, переключение по остаточному напряжению и переключение с выдержкой времени. Вариант переключения на резервный источник выбирается в режиме реального времени на основе контролируемых параметров (уровень напряжения на секциях, угол между напряжениями, разность частот напряжений секций). На рисунке 1.6 приведен график, показывающий возможные варианты переключения на резервный источник питания с помощью устройства SUE 3000.

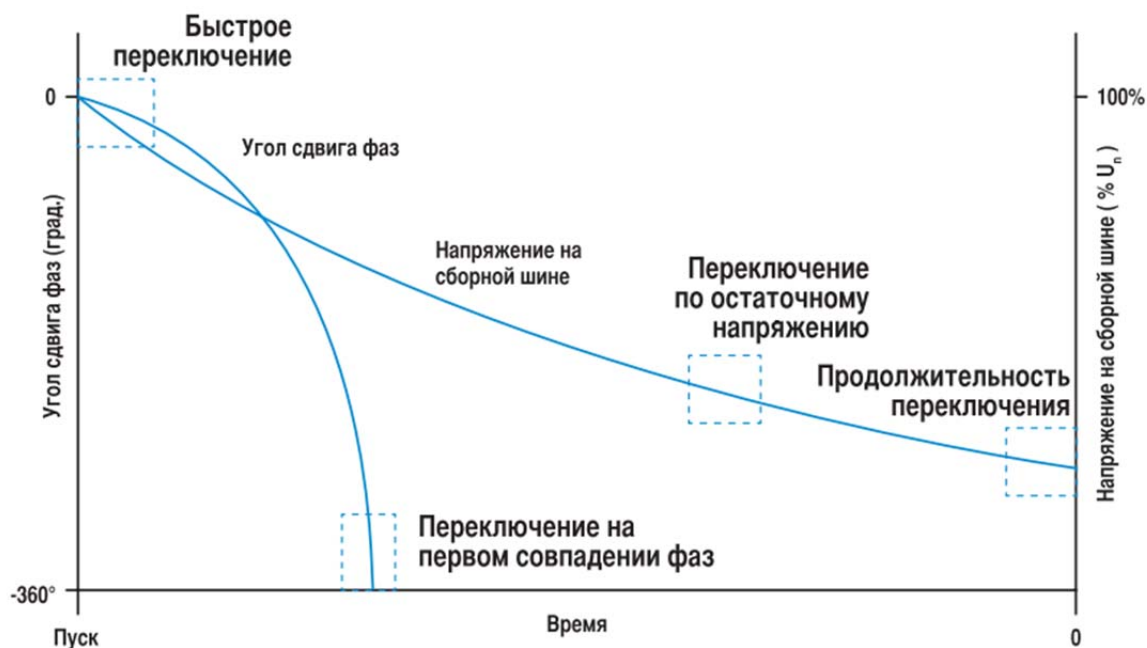


Рисунок 1.6 – Возможные варианты переключения на резервный источник питания с помощью устройства SUE 3000 [42, 43]

Недостатком такого подхода является то, что при близких коротких замыканиях, как в сети внешнего, так и внутреннего электроснабжения, контролируемые параметры могут значительно искажаться, что может привести к его неправильной работе [45].

Известен также подход к организации переключения на резервный источник питания, который и подход, описанный в [44] выполняет переключение на резервный источник питания, в котором предлагается дополнительно контролировать уровень тока на вводе секций [46, 47]. Недостатком такого подхода является необходимость использования сигналов от устройств релейной защиты в случае возникновения коротких замыканий, установленных на вводе секций основного и резервного источников питания. Указанным недостатком обладает и подход к переключению на резервный источник электроснабжения приведенный в [42, 43].

Известен подход к обеспечению быстрого переключения на резервный источник питания по своей структуре схож с [44] и в нем дополнительно выполняется контроль уровня токов на вводе секции основного и резервного

источников питания, а также угла между одноименными напряжениями секций основного и резервного источников питания. Приведенный подход реализован в устройстве автоматического включения резерва на базе двух микроконтроллеров М-0272 [48, 49] и М-4272 [50–52]. Схема подключения такого устройства показана на рисунке 1.7.

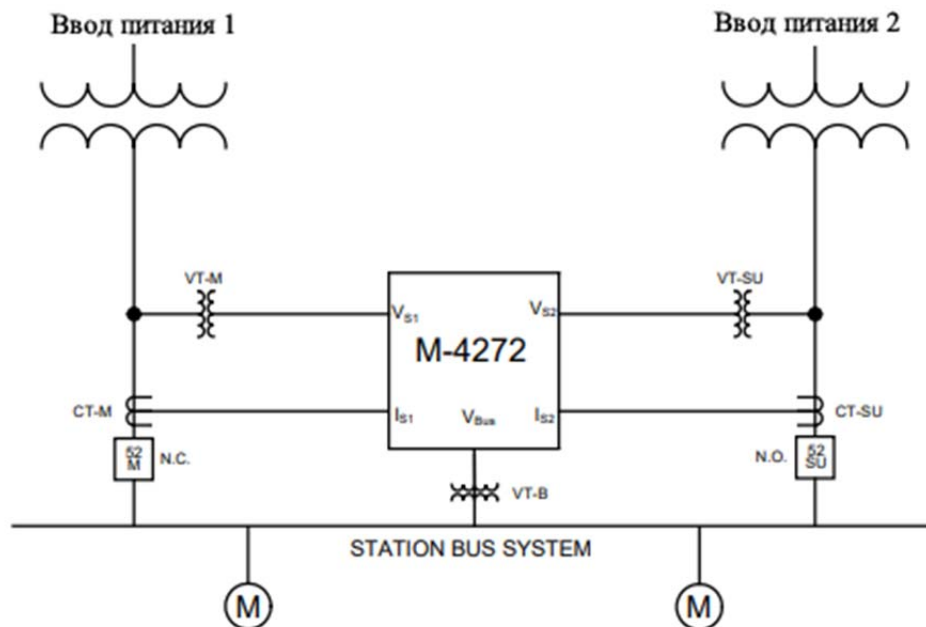


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема подключения микропроцессорного АВР на базе микроконтроллера М-4272 [50]

Недостатком приведенного подхода является то, что пусковыми сигналами для переключения на резервный источник питания являются сигналы от внешних защит, а в случае их отсутствия пуск осуществляется от внутреннего реле минимального напряжения с выдержкой времени.

Для обеспечения бесперебойного питания многомашинных электромеханических комплексов известен подход к построению пусковых органов быстродействующих устройств АВР [53–55], который включает в себя контроль угла между напряжениями прямой последовательности взаиморезервируемых секций, направления активной мощности на вводе секции основного источника питания, которое предлагается определять с использованием



доли напряжения резервной секции. Структурная схема реализации приведенного подхода показана на рисунке 1.8.

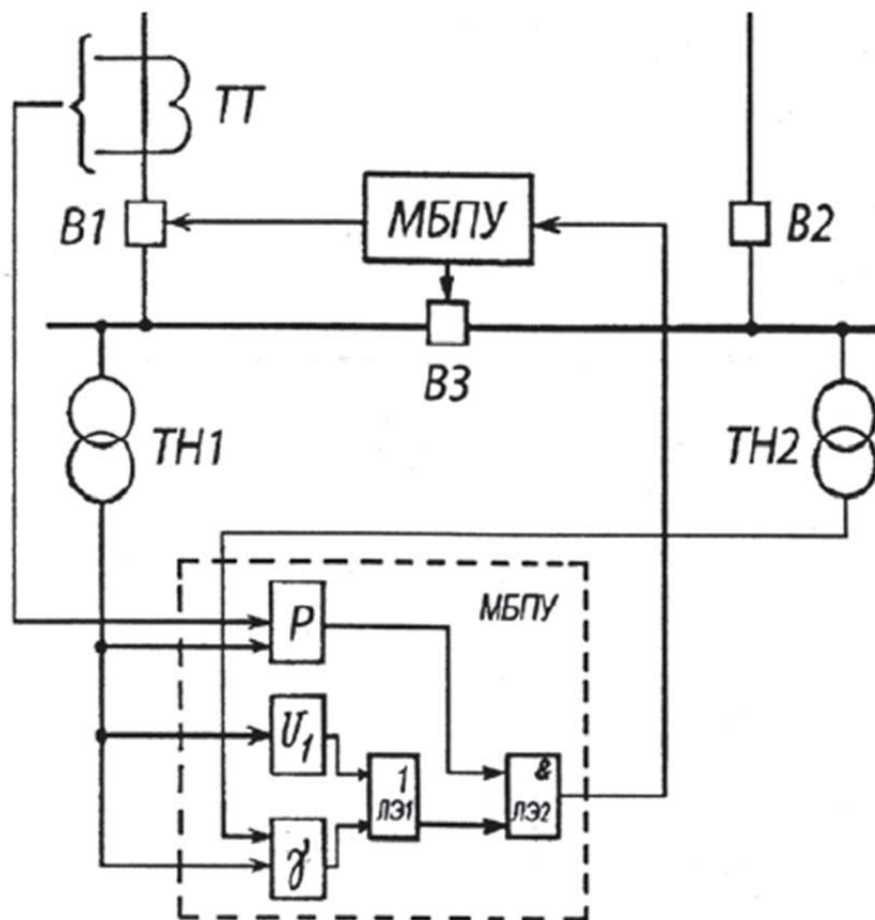


Рисунок 1.8 – Структурная схема реализации подхода к формированию пускового органа БАВР на основе органа направления мощности [55]

Недостатком приведенного подхода, согласно [56], является его ненадежная работа при несимметричных коротких замыканиях, обусловленная невозможностью правильно определить направление реактивной составляющей мощности.

С целью повышения чувствительности к появлению аварийным режимам известны модификации подхода, описанного в [53–55]. Отличие первой модификации заключается в том, что направление активной мощности предлагается выполнять для каждой фазы на основе комплексного значения действующего тока фазы и векторной суммы комплексных значений напряжений двух других фаз основного и резервного источников питания [38, 57]. Отличие

второй модификации [56] заключается в том, что направление мощностей в фазах на вводе основного и резервного источников определяют на основе фазных токов и противоположных линейных напряжений с учетом угла максимальной чувствительности, при этом, если значения линейных напряжений на шинах основного источника меньше заданного значения напряжения, то в качестве векторов этих напряжений принимают соответствующие напряжения резервного источника питания.

Однако, недостатком приведенных подходов к формированию пусковых органов БАВР [38, 53–57] является то, что они могут быть применены только в сетях с синхронизированными источниками питания из-за необходимости использования напряжений резервной секции для определения направления мощности на вводе секции основного источника питания.

Исходя из приведенного анализа существующих подходов к автоматическому управлению переключением на резервный источник, необходимо дальнейшее совершенствование подходов к формированию пусковых органов устройств БАВР для обеспечения устойчивой работы электродвигателей многомашинного электромеханического комплекса при кратковременных нарушениях нормального режима электроснабжения, обусловленных короткими замыканиями и потерей питания, по причинам, не связанным с короткими замыканиями.

### 1.3 Методы расчёта переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой

Применение современной микропроцессорной элементной базы для создания быстродействующих защит создают предпосылки реализации результатов более сложных, точных, многофакторных моделей объектов и процессов. Так, например, используемые ранее инженерные методики [4, 58–59], основанные на расчёте стационарных режимов с использованием алгебраических

уравнений имеют ряд допущений и приводят к значительным погрешностям в расчётах и загроблению уставок пусковых органов защит.

В настоящее время для анализа переходных процессов в системах электроснабжения получили широкое распространение методы математического моделирования, основанные на составлении и решении систем полных дифференциальных и алгебраических уравнений численными методами.

На практике широкое применение получил метод переменных состояния [60], который является универсальным для любых систем, описываемых с помощью дифференциальных уравнений. Применение метода переменных состояния позволяет минимизировать количество переменных в системе дифференциальных уравнений и свести ее решение к анализу дифференциальных уравнений первого порядка [61].

В общем случае математическая модель любой схемы электроснабжения включает в себя элементы трех типов: асинхронные двигатели, синхронные машины и  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементы, с помощью которых описываются другие элементы, входящие в состав сети, и должна отвечать следующим требованиям [62]:

- описывать систему электроснабжения любой структуры, конфигурации и в любом состоянии;
- учитывать в полном объёме каталожные данные как исходные данные для моделирования;
- отражать любой из реальных возможных случаев нарушения электроснабжения, работу устройств релейной защиты и автоматики.

Используемые в настоящее время математические модели для расчёта переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой [63–68] обладают рядом отличий, влияющих на скорость расчётов, гибкость и функциональность моделей.

Так, например, математические модели, основанные на использовании уравнений Парка-Горева, дают преимущества только в случаях, когда рассматривается отдельная электрическая машина. Применение двухфазной системы координат для записи дифференциальных уравнений синхронных и

асинхронных электродвигателей в известных математических моделях систем электроснабжения с двигательной нагрузкой [63, 64, 69] затрудняет расчёт всей модели, так как для определения напряжений в узлах схемы требуется выполнение приведения части переменных к трехфазной системе координат с учетом топологии сети, а также затрудняет расчёт несимметричных режимов, возникающих в сети и коммутаций. Использование уравнений Парка-Горева ограничивает точность вычислений, поскольку расчёт ограничен рядом принимаемых допущений, поэтому для исследования переходных процессов, сопровождающихся значительным изменением параметров, все более широкое применение начинают получать математические модели, в которых дифференциальные уравнения синхронных и асинхронных электродвигателей записаны в фазной системе координат.

Более совершенными для расчётов переходных процессов являются математические модели, в которых дифференциальные уравнения всех элементов сети представляются в фазной системе координат [67–70]. Переход к моделированию в фазных координатах позволяет расширить возможности моделей по области применения, по точности, организовывать любые вычисления и обеспечить более адекватное моделирование переходных процессов в схемах электроснабжения с двигательной нагрузкой [67, 71]. При таком подходе для формирования уравнений переходных процессов используется метод узловых напряжений, который по сравнению с другими методами позволяет обеспечить более низкий порядок системы уравнений.

На сегодняшний день системы электроснабжения с многодвигательной нагрузкой относятся к большим и сложным системам, так как включают в себя большое количество взаимосвязанных элементов, что в свою очередь приводит к увеличению порядка систем дифференциальных уравнений и усложняет процесс формирования систем уравнений на начальном этапе. Поэтому для повышения скорости расчётов переходных процессов предлагается производить эквивалентирование отдельных участков сети, а также выполнять раздельное решение электромеханических переходных процессов явными методами, а

электромагнитных – неявными. Однако применения эквивалентирования участков сети приводит к изменению характера переходных процессов, так как изменяется состав и характер свободных составляющих из-за того, что в результате замены разветвленной сети в схему вводятся суммарные емкости и эквивалентные индуктивности [71].

Кроме того, известен метод математического моделирования переходных процессов, основанный на применении теории объектно-ориентированного подхода [72–75]. Согласно теории объектно-ориентированного программирования сложная система представляет собой совокупность объектов, под которыми понимаются типовые элементы электрической сети, представленные в виде многополюсников, описываемых с помощью систем дифференциальных уравнений. Обмен информацией между элементами, входящими в состав математической модели, осуществляется при помощи матрицы соединений, а неизвестные токи всех элементов определяются из решения соответствующих систем дифференциальных уравнений.

В настоящее время для расчёта стационарных режимов и переходных процессов в системах электроснабжения разработаны и применяются программные комплексы, наиболее распространёнными из них являются MATLAB компании MathWorks [76], Power Factory компании DlgSILENT [77] и DAKAR компании Elesk [78]. Однако, не смотря на многофункциональность и широкие возможности приведенных программ, в них используются упрощенные схемы замещения электрических машин, что при моделировании многомашинных систем с двигательной нагрузкой большой мощности не позволяет правильно отражать возникающие переходные процессы, а изменение схем замещения является весьма затруднительным либо вообще невозможным. Следует отметить, что применение готовых программных продуктов требует времени на изучение синтаксиса и особенностей использования программы, что вносит дополнительные сложности в процедуру разработки и исследования математических моделей.

В связи с вышесказанным возникает необходимость разработки математической модели многомашинного электромеханического комплекса адаптированного к исследованию процессов возникающих в сети при автоматическом включении резервного электроснабжения.

#### 1.4 Выводы по разделу 1. Цели и задачи исследования

1. Приведенный обзор научных подходов к разработке и применению технических решений в области автоматического управления переключением на резервный источник питания показывает, что, несмотря на большое количество существующих решений, продолжается их совершенствование в контексте более полной адаптации функциональности (алгоритмов работы, структур и параметров схемотехники) к допустимым параметрам функционирования технологических установок в режимах автоматического включения резервного электроснабжения (для обеспечения устойчивой работы двигательной нагрузки на предприятиях с непрерывным технологическим процессом при кратковременных нарушениях электроснабжения).

2. Технические возможности микропроцессорной элементной базы позволяют существенно расширить функциональность систем автоматического управления переключением на резервный источник питания, и в результате существенного сокращения времени перерыва питания обеспечить более благоприятные условия к самозапуску мощных синхронных и асинхронных двигателей многомашинных электромеханических комплексов.

3. Принцип выявления аварийного режима в сети внешнего электроснабжения по факту изменения направления мощности в наибольшей степени согласуется с критериями реализации устройства быстродействующего включения резервного электроснабжения технологических установок с непрерывным циклом.

4. Известные исследования и созданные на их основе технические решения в области автоматического включения резервного питания технологических

установок с непрерывным циклом, включая наиболее функционально насыщенные устройства допускают некорректное определение аварийного режима в сети внешнего электроснабжения при несимметричных коротких замыканиях, а также при близких коротких замыканиях в сети внутреннего электроснабжения, что свидетельствует о некорректности используемых алгоритмов функционирования систем автоматизации включения резервного электроснабжения.

Таким образом, тема диссертационной работы «Совершенствование методов и устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения» имеет научную и практическую актуальность.

Это определяет цель работы – обоснование способов модификации устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки путем устранения ресурсоснижающего фактора динамической перегрузки технологических электромеханических устройств.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор исследований в области управления динамическими режимами электромеханических устройств при управлении параметрами их электропитания и обоснование направления научных исследований.

2. Разработка математической модели системы электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса, содержащего асинхронные и синхронные двигатели средней и большой мощности, адаптированной к анализу переходных процессов, обусловленных кратковременными нарушениями электроснабжения потребителей и позволяющей учитывать взаимное влияние энергетических потоков, генерируемых электрическими машинами.

3. Обоснование предельных электромеханических параметров объекта управления и критериев реализации управляющих воздействий применительно к процессу переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения.

4. Математическое моделирование и анализ режимов работы многомашинного электромеханического комплекса с асинхронными и синхронными электродвигателями при использовании вариантов реализации устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАРВ).

5. Обоснование приемлемого принципа функционирования пускового органа БАВР и его техническая реализация.

6. Экспериментальные исследования процесса автоматического включения резерва электроснабжения технологических установок, обоснованного методами математического моделирования, анализ и обобщение экспериментальных данных, установление адекватности теоретических исследований результатам эксперимента.

7. Техническая реализация и внедрение результатов диссертационных исследований.



## РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МАШИН, АДАПТИРОВАННЫХ К ИССЛЕДОВАНИЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В настоящее время существует большое количество работ, в области обоснования структуры параметров и исследования различной степени сложности математических моделей систем электроснабжения с двигательной нагрузкой, в которых представлены в качестве компонентов асинхронные и синхронные двигатели, трансформаторы, кабельные и воздушные линии электропередач, источники питания и т.д. Как правило, модели отдельных элементов представляются в виде полных или упрощенных систем дифференциальных уравнений, записанных в различных системах координат. Так, например, дифференциальные уравнения синхронных и асинхронных двигателей записывают обычно в различных двухфазных системах координат: асинхронные – в  $\alpha, \beta$  или  $x, y$ , а синхронные – в  $d, q$ . При такой форме записи уравнений затрудняется расчёт всей модели системы электроснабжения, поскольку на каждом шаге расчета требуется выполнять операции преобразования переменных к единой системе координат. Поэтому более рационально использовать для всех элементов уравнения, записанные в трехфазной естественной системе координат, для чего необходимо получить соответствующие математические модели для всех элементов сети.

Определение параметров схем замещения элементов, входящих в состав математической модели, является одним из наиболее важных факторов, требующих особого внимания. Для повышения точности расчетов для двигателей необходимо учитывать явление вытеснения тока в роторе и поэтому наиболее рационально использовать многоконтурные схемы замещения двигателей. Определению параметров многоконтурных схем замещения асинхронных двигателей по исходным каталожным или экспериментальным данным посвящен ряд работ [79–86]. Однако найденные по синтезированным указанными методами

схемам замещения значения токов и моментов могут отличаться от исходных каталожных значений на 30–40% и более. Методики определения параметров схем замещения синхронных электродвигателей, описанные в [79,85,86,62] не содержат достаточного количества информации необходимой для расчёта статических и динамических характеристик в переходных режимах по дифференциальным уравнениям.

## 2.1 Определение параметров схемы замещения и математическая модель асинхронного двигателя

Известные методики определения параметров многоконтурных схем замещения асинхронных двигателей на основе каталожных данных [79–86] имеют ряд недостатков. Они предполагают использование, кроме каталожных данных, сведений о конструктивных особенностях машины [79], данных о КПД для различных коэффициентов загрузки [80], не учитывают влияние эффекта вытеснения тока в роторе [80–84], используют для учета потерь в стали активное сопротивление в ветви намагничивания [80], что недостаточно корректно при анализе переходных процессов. Поэтому предлагается усовершенствованный метод определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по известным каталожным данным, лишённый указанных недостатков [87].

За основу принимается Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, приведенная на рисунке 2.1. Схема содержит активное  $R_S$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_{\sigma S}$  обмотки статора, активное  $R_{r1}$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_{\sigma r1}$  первого контура ротора, активное  $R_{r2}$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_{\sigma r2}$  второго контура ротора, а также сопротивление взаимоиндукции  $X_\mu$  общее для контуров статора, ротора и контура потерь в стали. Для учета потерь на намагничивание в стали статора предусмотрен также дополнительный короткозамкнутый контур на статоре, аналогичный роторным контурам и состоящий из активного сопротивления  $R_{fe}$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_{\sigma fe}$ .

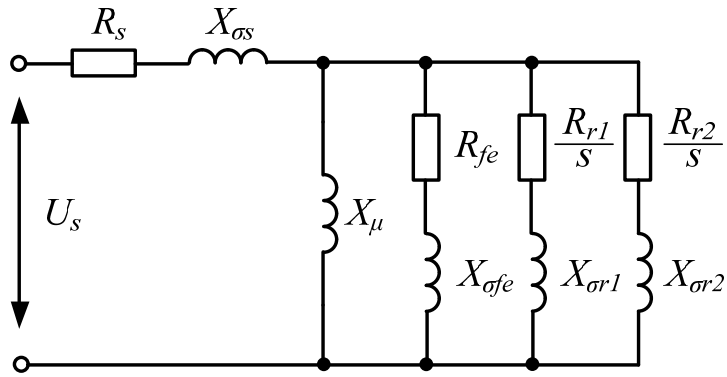


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Эффект вытеснения тока в короткозамкнутой обмотке ротора учтен с помощью двух параллельно включенных сопротивлений ротора. Каждое из этих двух сопротивлений ротора не зависит от скольжения, а их результирующее значение является функцией от скольжения, что позволяет с их помощью учесть влияние эффекта вытеснения в роторе на его сопротивления.

Определение параметров эквивалентной схемы замещения производится на основе каталожных или уточненных из эксперимента данных по алгоритму, приведенному в [86]. Все зависимости и значения параметров в дальнейшем будут приводиться в системе общепринятых относительных единиц (о.е.), за базисную мощность принимается номинальная полная мощность асинхронного двигателя [86], при этом  $U_H=1$ ,  $I_H=1$ ,  $P_H = \cos\varphi_H \cdot \eta_H$ ,  $M_H = P_H \cdot (1-s_H)^{-1}$ .

Для определения вектора искомых параметров схемы замещения  $Z=[R_s, X_{\sigma s}, X_{\mu}, R_{fe}, X_{\sigma fe}, R_{r1}, X_{\sigma r1}, R_{r2}, X_{\sigma r2}]^{tr}$  составляется система нелинейных уравнений (2.1), записанная из условий равенства расчётных и каталожных значений номинального (при  $s_H$ ) и пускового (при  $s_l=1$ ) токов статора; номинального, максимального и пускового вращающихся моментов; номинального КПД при номинальном напряжении  $U_H = 1$ . Система уравнений (2.1) также дополнена неравенствами, обеспечивающими условия физической реализуемости параметров асинхронного двигателя, которые заключаются в том, чтобы все сопротивления в схеме замещения должны быть положительными.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_H - M(Z, s_H) = 0; \\ I_H - I_s(Z, s_H) = 0; \\ M_\Pi - M(Z, s_1) = 0; \\ I_\Pi - I_s(Z, s_1) = 0; \\ M_M - M(Z, s_M) = 0; \\ \eta_H - \eta(Z, s_H) = 0; \\ R_{r1} > 0; R_{r2} > 0; R_{fe} > 0; X_{\sigma r1} > 0; X_{\sigma r2} > 0; X_{\sigma fe} > 0; X_\mu > 0. \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Для решения системы уравнений (2.1) запишем выражения на основе схемы замещения для определения токов статора, моментов и КПД. Ток статора рассчитывается как:

$$I_s(Z, s) = \frac{U_H}{Z_{BX}(Z, s)}. \quad (2.2)$$

Используемое в формуле (2.2) входное сопротивление асинхронного двигателя  $Z_{BX}(Z, s)$  определяется по формуле:

$$Z_{BX}(Z, s) = Z_s + \left[ Z_\mu^{-1} + Z_{fe}^{-1} + Z_{r1}(s)^{-1} + Z_{r2}(s)^{-1} \right]^{-1},$$

где:

$$Z_s = R_s + jX_{\sigma s},$$

$$Z_{r1}(s) = \frac{R_{r1}}{s} + jX_{\sigma r1},$$

$$Z_{r2}(s) = \frac{R_{r2}}{s} + jX_{\sigma r2},$$

$$Z_{fe} = R_{fe} + jX_{\sigma fe},$$

$$Z_\mu = jX_\mu.$$

Поскольку в относительных единицах значения момента и активной мощности совпадают, то выражение для момента записывается как разность между входной активной мощностью  $P_{BX}(Z, s)$  и потерями мощности  $\Delta P(Z, s)$ :

$$M(Z, s) = P_{BX}(Z, s) - \Delta P(Z, s). \quad (2.3)$$

Входная активная мощность определяется по формуле:

$$P_{BX}(Z, s) = \operatorname{Re}(Z_{BX}(Z, s)) \cdot |I_s(Z, s)|^2.$$

Общие потери мощности в двигателе  $\Delta P(Z, s)$  состоят из потерь в меди обмоток статора  $\Delta P_s$  и ротора  $\Delta P_r$ , а также в стали статора  $\Delta P_{fe}$ . Потери механические  $\Delta P_{MEH}$  и добавочные  $\Delta P_{ДОБ}$  составляют обычно в сумме порядка одного процента от номинальной мощности  $P_H$ . Тогда выражение для определения общих потерь имеет вид:

$$\Delta P(Z, s) = \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{fe} + 0,01 \cdot P_H.$$

Потери в меди обмоток статора  $\Delta P_s$  и ротора  $\Delta P_r$  определяются по формулам:

$$\Delta P_s = R_s \cdot |I_s|^2, \quad (2.4)$$

$$\Delta P_r = R_{r1} \cdot |I_{r1}|^2 + R_{r2} \cdot |I_{r2}|^2 = R_{r1} \cdot \left| \frac{U_\mu}{Z_{r1}(s)} \right|^2 + R_{r2} \cdot \left| \frac{U_\mu}{Z_{r2}(s)} \right|^2. \quad (2.5)$$

Потери в стали статора  $\Delta P_{fe}$  рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{fe} = R_{fe} \cdot |I_{fe}|^2 = R_{fe} \cdot \left| \frac{U_\mu}{Z_{fe}} \right|^2. \quad (2.6)$$

Значение напряжения  $U_\mu$ , используемое в формулах (2.4) – (2.6), определяется как:

$$U_\mu = U_H - Z_s \cdot I_s(Z, s).$$

Расчетное значение КПД определяется по выражению:

$$\eta(Z, s_H) = (P_{BX}(Z, s_H) - \Delta P(Z, s_H)) \cdot (P_{BX}(Z, s_H))^{-1}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора  $X_{\sigma s}$ , согласно [87], можно принять равным половине или одной трети входного сопротивления асинхронного двигателя при заторможенном роторе ( $s_l=1$ ), например:

$$X_{\sigma s} = U_H \cdot (2 \cdot I_H)^{-1}.$$

Для решения нелинейной системы уравнений (2.1) должны быть найдены также начальные приближения для остальных искоемых параметров вектора  $Z$ .

Активное сопротивление статора и параметры контура потерь в стали определяется из уравнений баланса активных мощностей для номинального режима.

Так как суммарные потери в асинхронной машине ( $\Delta P$ ) состоят из переменных потерь, зависящих от токов статора и ротора (потери в меди статора  $\Delta P_{VAR}^S$  и ротора  $\Delta P_{VAR}^R$ ), постоянных потерь (потери в стали статора  $\Delta P_{fe}$ ), добавочных и механических потерь, то для номинального режима допустимо записать следующие соотношения:

$$\Delta P_H = \Delta P_{HVAR}^S + \Delta P_{HVAR}^R + \Delta P_{fe} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_{МЕХ}, \quad (2.7)$$

$$\Delta P_H = \cos \varphi_H \cdot (1 - \eta_H), \quad (2.8)$$

$$\Delta P_{HVAR}^R = \frac{P_H \cdot s_H}{1 - s_H},$$

$$\Delta P_{fe} = R_{fe} \cdot \left| \frac{U_H - Z_S \cdot I_H}{R_{fe} + j \cdot X_{\sigma fe}} \right|^2.$$

Из [86] известно, что максимальное значение коэффициента полезного действия для асинхронного двигателя достигается при коэффициенте загрузки  $k_3$  порядка 70–75% от номинальной мощности двигателя, а переменные потери в этом случае равны постоянным потерям, то есть потерям в стали, которые определяются по формуле:

$$\Delta P_{CONST} = \Delta P_{fe} = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_H \cdot \frac{1}{1 + k_3^2} = \frac{\cos \varphi_H \cdot (1 - \eta_H)}{2 \cdot (1 + k_3^2)}. \quad (2.9)$$

С учётом известных переменных потерь в статоре с помощью (2.7) и (2.9) может быть определено активное сопротивление статора:

$$R_S = \Delta P_{HVAR}^S \cdot (I_H)^{-2}, \quad (2.10)$$

где:

$$\Delta P_{HVAR}^S = \Delta P_H - \Delta P_{HVAR}^R - \Delta P_{CONST} - \Delta P_{ДОБ} - \Delta P_{МЕХ}.$$

В состав контура потерь в стали входит активное и индуктивное сопротивление, соотношение между которыми, согласно [88], может быть принято как  $X_{\sigma fe} = [0,5-0,7]R_{fe}$ . Поэтому в соответствии с вышесказанным и с учетом (2.8) и (2.10) активное и индуктивное сопротивления контура потерь в стали определяется следующим образом:

$$R_{fe} = \frac{1}{\Delta P_{fe}} \cdot \left| \frac{U_H - Z_s \cdot I_H}{1 + j \cdot 0,6} \right|^2,$$

$$X_{\sigma fe} = 0,6 \cdot R_{fe}.$$

Сопротивление взаимоиндукции  $X_\mu$  общее для всех контуров может быть найдено с использованием приближенной формулы, приведенной в [79], которая имеет вид:

$$X_\mu = \left[ \sqrt{1 - \cos \varphi_H^2} - (M_M - \sqrt{M_M^2 - 1}) \cdot \cos \varphi_H \right]^{-1}.$$

При номинальном скольжении сопротивление короткозамкнутого ротора определяется как:

$$Z_r(s_H) = \left[ \frac{1}{Z_{BX}(Z, s_H) - Z_s} - \frac{1}{Z_{fe}} - \frac{1}{Z_\mu} \right]^{-1}.$$

Так как в области рабочих скольжений сопротивления ротора в основном зависит от параметров рабочего (первого) контура, расположенного ближе к воздушному зазору, то сопротивление этого контура принимается равным:

$$Z_{r1} = \text{Re}(Z_r(s_H)) \cdot s_H + j \cdot \text{Im}(Z_r(s_H)) = R_{r1} + j \cdot X_{\sigma r1}.$$

Входное полное сопротивление асинхронного двигателя при скольжении  $s = 1$  и напряжении  $U_H$  определяется как:

$$Z_{BX}(s_1) = R_s + \frac{M_\Pi \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}{I_\Pi^2 \cdot (1 - s_H)} + |I_{fe}|^2 \cdot \frac{R_{fe}}{I_\Pi^2} +$$

$$+ j \cdot \left[ \sqrt{\left[ \frac{U_H}{I_\Pi} \right]^2} - \left[ R_s + \frac{M_\Pi \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}{I_\Pi^2 \cdot (1 - s_H)} + |I_{fe}|^2 \cdot \frac{R_{fe}}{I_\Pi^2} \right]^2 \right].$$

Сопротивление пускового (второго) контура определяется по формуле:

$$Z_{r2}(s_1) = \left[ \frac{1}{Z_{BX}(s_1) - Z_s} - \frac{1}{Z_{fe}} - \frac{1}{Z_\mu} - \frac{1}{Z_{r1}} \right]^{-1} = R_{r2} + j \cdot X_{\sigma r2}.$$

Начальные приближения параметров для решения системы (2.1) также могут быть определены с использованием инженерного или приближенного метода расчёта параметров эквивалентной схемы замещения [89]. Согласно этому

методу активное и индуктивное сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя рассчитываются по формулам:

$$R_s = s_H ,$$

$$X_{\sigma s} = \frac{1}{2 \cdot I_{\Pi}} .$$

Пренебрегая потерями в стали, номинальные значения коэффициента мощности и КПД соответственно равны:

$$\eta_H' = 1 - R_s - \frac{\eta_H \cdot \cos \phi_H \cdot s_H}{1 - s_H} ,$$

$$\cos \phi_H' = \frac{\eta_H \cdot \cos \phi_H}{\eta_H' } .$$

Из круговой диаграммы АД ток намагничивания определяется по следующей формуле:

$$i_{\mu} = \sin \phi_H' - \left( M_M - \sqrt{M_M^2 - 1} \right) \cdot \cos \phi_H' .$$

Зная ток намагничивания  $i_{\mu}$  и индуктивное сопротивление статора  $X_{\sigma s}$ , индуктивное сопротивление ветви намагничивания может быть рассчитано как:

$$X_{\mu} = \frac{1}{i_{\mu}} - X_{\sigma s} .$$

Входное активное  $R_{BX}^{S_H}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{S_H}$  сопротивления асинхронного двигателя при номинальном скольжении принимаются равными соответственно:

$$R_{BX}^{S_H} = \cos \phi_H' ,$$

$$X_{BX}^{S_H} = \sin \phi_H' .$$

Входное активное  $R_{BX}^{S=1}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{S=1}$  сопротивления асинхронного двигателя при скольжении равном единице принимаются равными:

$$R_{BX}^{S=1} = R_s + \frac{M_{\Pi} \cdot \cos \phi_H' \cdot \eta_H'}{I_{\Pi}^2 \cdot (1 - s_H)} ,$$

$$X_{BX}^{S=1} = \sqrt{\frac{1}{I_{\Pi}^2} - \left( R_{BX}^{S=1} \right)^2} .$$



Активная  $g_r^{S_H}$  и реактивная  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора для номинального скольжения рассчитываются следующим образом:

$$g_r^{S_H} = \frac{R_{BX}^{S_H} - R_S}{\left(R_{BX}^{S_H} - R_S\right)^2 + \left(X_{BX}^{S_H} - X_{\sigma S}\right)^2},$$

$$b_r^{S_H} = \frac{X_{BX}^{S_H} - X_{\sigma S}}{\left(R_{BX}^{S_H} - R_S\right)^2 + \left(X_{BX}^{S_H} - X_{\sigma S}\right)^2} - \frac{1}{X_\mu}.$$

Зная активную  $g_r^{S_H}$  и реактивную  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора можно определить активное  $R_{r1}$  и индуктивное  $X_{\sigma r1}$  сопротивления первого контура ротора:

$$R_{r1} = \frac{g_r^{S_H} \cdot S_H}{\left(g_r^{S_H}\right)^2 + \left(b_r^{S_H}\right)^2},$$

$$X_{\sigma r1} = \frac{b_r^{S_H}}{\left(g_r^{S_H}\right)^2 + \left(b_r^{S_H}\right)^2}.$$

Аналогичным образом определяются известные проводимости, активное  $R_{r2}$  и индуктивное  $X_{\sigma r2}$  сопротивления второго контура ротора:

$$g_{r2}^{S=1} = g_r^{S=1} - \frac{R_{r1}^{S=1}}{\left(R_{r1}^{S=1}\right)^2 + \left(X_{\sigma r1}^{S=1}\right)^2},$$

$$b_{r2}^{S=1} = b_r^{S=1} - \frac{X_{\sigma r1}^{S=1}}{\left(R_{r1}^{S=1}\right)^2 + \left(X_{\sigma r1}^{S=1}\right)^2},$$

$$R_{r2} = \frac{g_{r2}^{S=1}}{\left(g_{r2}^{S=1}\right)^2 + \left(b_{r2}^{S=1}\right)^2},$$

$$X_{\sigma r2} = \frac{b_{r2}^{S=1}}{\left(g_{r2}^{S=1}\right)^2 + \left(b_{r2}^{S=1}\right)^2}.$$

После определения начальных приближений параметров производится их уточнение путем решения переопределенной системы уравнений и неравенств (2.1) с помощью одного из численных методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска минимума функционала невязки или др.

Стоит отметить, что расчётное значение максимального вращающего момента находится по (2.3) путем выборки наибольшего значения момента при изменении скольжения в диапазоне  $s = [0 \div 0.25]$ .

Математическая модель асинхронного двигателя записывается в виде системы дифференциальных уравнений, в которой токи статора записаны в трехфазной системе координат, а токи ротора в двухфазной системе координат с учетом зависимости потокоцеплений и индуктивностей двигателя от угла положения ротора  $\gamma$ .

Система дифференциальных уравнений асинхронного двигателя, записанная в матричной форме, будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} pI_S \\ pI_R \end{bmatrix} = L(\gamma)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_S \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

где:  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования;

$I_S$  и  $I_R$  – векторы токов статора и ротора соответственно;

$L(\gamma)$  – матрица индуктивностей статора и ротора;

$U_S$  – вектор напряжений обмоток статора и ротора;

$R_S$  и  $R_R$  – матрицы активных сопротивлений статора и ротора соответственно;

$\omega$  – скорость вращения ротора;

$\frac{dL(\gamma)}{d\gamma}$  – матрица производных от индуктивностей статора и ротора.

Для учета зависимости потокоцеплений и индуктивностей двигателя от угла положения ротора  $\gamma$  матрицу индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора двигателя  $L(\gamma)$  можно представить в виде четырех подматриц: статор-статор  $L_{S-S}$ , статор-ротор  $L_{S-R}(\gamma)$ , ротор-ротор  $L_{R-R}$ , ротор-статор  $L_{R-S}(\gamma)$ . Указанная матрица и её подматрицы имеют вид:

$$L(\gamma) = \begin{bmatrix} L_{S-S} & L_{S-R}(\gamma) \\ L_{R-S}(\gamma) & L_{R-R} \end{bmatrix},$$

$$L_{S-S} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} (2 \cdot L_S + 2 \cdot L_\mu + L_0) & -(L_S + L_\mu - L_0) & -(L_S + L_\mu - L_0) \\ -(L_S + L_\mu - L_0) & (2 \cdot L_S + 2 \cdot L_\mu + L_0) & -(L_S + L_\mu - L_0) \\ -(L_S + L_\mu - L_0) & -(L_S + L_\mu - L_0) & (2 \cdot L_S + 2 \cdot L_\mu + L_0) \end{bmatrix},$$

$$L_{S-R}(\gamma) = L_\mu \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix},$$

$$L_{R-R} = \begin{bmatrix} L_{fe} + L_\mu & 0 & L_\mu & 0 & L_\mu & 0 \\ 0 & L_{fe} + L_\mu & 0 & L_\mu & 0 & L_\mu \\ L_\mu & 0 & L_{\alpha 1} + L_\mu & 0 & L_\mu & 0 \\ 0 & L_\mu & 0 & L_{\beta 1} + L_\mu & 0 & L_\mu \\ L_\mu & 0 & L_\mu & 0 & L_{\alpha 2} + L_\mu & 0 \\ 0 & L_\mu & 0 & L_\mu & 0 & L_{\beta 2} + L_\mu \end{bmatrix},$$

$$L_{R-S}(\gamma) = \frac{2}{3} \cdot L_\mu \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ \cos(\gamma) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ \cos(\gamma) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix}.$$

Соответственно, обратная матрица индуктивностей  $L(\gamma)^{-1}$  имеет вид:

$$L(\gamma)^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{L}_{S-S} & \tilde{L}_{S-R}(\gamma) \\ \tilde{L}_{R-S}(\gamma) & \tilde{L}_{R-R} \end{bmatrix}.$$

Матрицы активных сопротивлений статора  $R_S$  и ротора  $R_R$  являются диагональными и записываются следующим образом:

$$R_S = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix},$$

$$R_R = \begin{bmatrix} R_{fe} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{fe} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{\alpha 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{\beta 1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\alpha 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\beta 2} \end{bmatrix}$$

Матрица производных от индуктивностей статора и ротора  $\frac{dL(\gamma)}{d\gamma}$ , так же как и матрица индуктивностей, состоит из четырёх подматриц: статор-статор  $\frac{dL_{S-S}}{d\gamma}$ , статор-ротор  $\frac{dL_{S-R}(\gamma)}{d\gamma}$ , ротор-ротор  $\frac{dL_{R-R}}{d\gamma}$ ;, ротор-статор  $\frac{dL_{R-S}(\gamma)}{d\gamma}$ , которые имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dL_{S-S}}{d\gamma} &= 0, \\ \frac{dL_{S-R}(\gamma)}{d\gamma} &= L_{\mu} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\gamma) & -\cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & -\cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & -\cos(\gamma) \\ \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) \\ -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix}, \\ \frac{dL_{R-R}}{d\gamma} &= 0, \\ \frac{dL_{R-S}(\gamma)}{d\gamma} &= \frac{2}{3} \cdot L_{\mu} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\cos(\gamma) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\cos(\gamma) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{3}) & -\cos(\gamma + \frac{\pi}{6}) \\ -\cos(\gamma) & \cos(\gamma + \frac{\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений (2.11) дополняется ещё двумя уравнениями для определения скорости вращения ротора  $\omega$  и угла поворота ротора  $\gamma$ . Тогда системе дифференциальных уравнений асинхронного электродвигателя принимает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} pI_S \\ pI_R \end{bmatrix} &= L(\gamma)^{-1} \cdot \left[ \begin{bmatrix} U_S \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \right] \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{T_j} \left[ M_{\text{вп}}(i, \psi) - M_c(\omega) \right], \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega \end{aligned}$$

где:

$$M_{вр}(i, \psi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ (i_B - i_C) \psi_A - (\psi_B - \psi_C) i_A \right];$$

$$M_c(\omega) = M_{нач} + (M_{нач} - M_{кон}) \cdot \omega^2.$$

При выполнении расчётов переходных процессов для многомашинных систем электроснабжения для каждого из электродвигателей необходимо определять его противо-ЭДС, которая определяется по формуле:

$$\xi_{AD} = \omega \cdot L_{S-R}(\gamma) \cdot \tilde{L}_{R-R} \cdot \frac{dL_{R-S}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_S + (L_{S-R}(\gamma) \cdot \tilde{L}_{R-R} \cdot R_R - \omega \cdot \frac{dL_{S-R}(\gamma)}{d\gamma}) \cdot I_R.$$

Приведенная математическая модель асинхронного двигателя позволяет выполнить моделирование различных режимов работы как одного электродвигателя, так и группы различных электродвигателей, как в симметричных, так и несимметричных режимах.

## 2.2 Определение параметров схемы замещения и математическая модель явнополюсного синхронного двигателя

Синхронные двигатели имеют сложный характер зависимостей активного и индуктивного сопротивлений ротора от насыщения и вытеснения тока. Поэтому при расчете параметров синхронных двигателей необходимо использовать схемы замещения с нелинейными зависимостями параметров ротора [90]. Известные методики определения параметров схемы замещения, приведенные в [79, 91] не позволяют рассчитать параметры схемы замещения пригодной для расчёта статических и динамических характеристик. Методы определения параметров, используемые установившиеся, переходные и сверхпереходные сопротивления [92] позволяют определять только значения сверхпереходных токов и токов короткого замыкания в установившихся режимах и не обладают достаточной информацией для расчёта статических и динамических режимов. Также известны методы, в которых за основу берут расчёт картины электромагнитного поля [62], однако такие методы являются сложными и мало используются в инженерной практике.

Явнополюсные синхронные двигатели с целью возможности осуществления асинхронного пуска снабжаются пусковой обмоткой, стержни которой закладываются в полюсные башмаки ротора и электрически соединяются между собой, а также со стержнями соседних полюсных башмаков. В результате образуется полная пусковая обмотка в осях  $d$  и  $q$  и обмотка возбуждения по оси  $d$ . В связи с указанными конструктивными особенностями явнополюсного ротора синхронного двигателя влияние вытеснения тока и насыщения на пусковые характеристики не значительное и его можно не учитывать. Схема замещения явнополюсного синхронного двигателя в осях  $d$  и  $q$  приведена на рисунке 2.2.

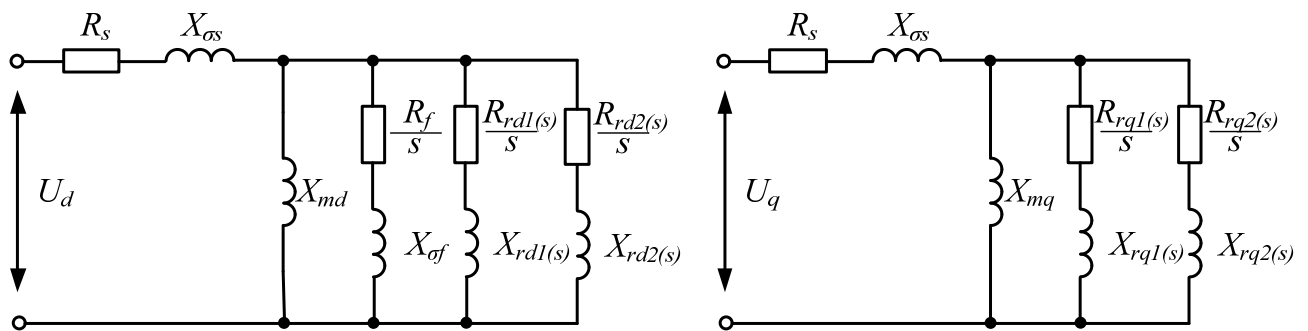


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема замещения синхронного двигателя

За основу принят метод определения параметров пусковой обмотки и остальных параметров схемы замещения по исходным каталожным данным. В качестве исходных данных примем известные значения активного сопротивления обмотки статора  $R_s$ , индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $X_{\sigma s}$ , индуктивное сопротивления взаимоиндукции по осям  $d$  и  $q$   $X_{md}$  и  $X_{mq}$ , индуктивное сопротивления рассеяния обмотки возбуждения  $X_{\sigma f}$ , сверхпереходные индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$   $X_d''$  и  $X_q''$ , а также постоянные времени демпферной обмотки по осям  $d$  и  $q$   $T_{d0}$  и  $T_{q0}$  и обмотки возбуждения  $T_{f0}$ .

Из схемы замещения (Рисунок 2.2) для скольжения  $s=\infty$  можно получить следующие выражения для сверхпереходного и переходного сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ :

$$X_q'' = X_q'', \quad (2.12)$$

$$X_d'' = X_{\sigma S} + \left( \frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma d}} \right), \quad (2.13)$$

$$X_q'' = X_{\sigma S} + \left( \frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{\sigma q}} \right). \quad (2.14)$$

Из зависимостей (2.12) – (2.14) индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки по осям  $d$  и  $q$  определяются как:

$$X_{\sigma rd} = \left( \frac{1}{X_d'' - X_{\sigma S}} - \frac{1}{X_{md}} - \frac{1}{X_{\sigma f}} \right)^{-1},$$

$$X_{\sigma rq} = \left( \frac{1}{X_q'' - X_{\sigma S}} - \frac{1}{X_{mq}} \right)^{-1}.$$

Активные сопротивления демпферной обмотки можно определить следующим образом:

$$R_{rd} = \frac{X_{\sigma rd} + X_{md}}{314 \cdot T_{d0}},$$

$$R_{rq} = \frac{X_{\sigma rq} + X_{mq}}{314 \cdot T_{q0}},$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_f}.$$

Во многих случаях отсутствуют сведения о переходных и сверхпереходных сопротивлениях и всех постоянных времени, а имеются лишь следующие каталожные данные: номинальная мощность  $P_H$ , номинальный ток  $I_H$  статора, максимальный  $M_M$  и пусковой  $M_{II}$  моменты, кратность пускового тока  $I_{II}$  относительно номинального, ток обмотки возбуждения  $I_{fH}$  и напряжение обмотки возбуждения  $U_{fH}$  или ее постоянная времени  $T_{f0}$ .

В этом случае синхронные индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  определяется по формулам:

$$X_q = \frac{\sin \phi_H + \cos \phi_H \cdot \sqrt{M_M^2 \eta_H^2 - 1}}{M_M^2 \eta_H^2 \cos^2 \phi_H},$$

$$X_d = 1,67 \cdot X_q.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора  $X_{\sigma S}$  и индуктивные сопротивления ветвей намагничивания по осям  $d$  и  $q$  рассчитываются по следующим выражениям:

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot K_i},$$

$$X_{md} = X_d - X_{\sigma S},$$

$$X_{mq} = X_q - X_{\sigma S}.$$

Параметры обмотки возбуждения определяются по её известной постоянной времени  $T_{f0}$ , приняв в качестве исходных соотношения:

$$X'_d = 1,5 \cdot X''_d, \quad (2.15)$$

$$X''_q = 1,1 \cdot X''_d, \quad (2.16)$$

$$X''_d = \frac{1}{I_n}.$$

Тогда, из (2.13) с учетом (2.15) и (2.16) можно определить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения и ее активное сопротивление:

$$X_{\sigma f} = \frac{X_{md}}{I_n \cdot X_{md} - 1},$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_{f0}}.$$

Если постоянная времени обмотки возбуждения не известна, а известны ее номинальные напряжение и ток, то активное сопротивление обмотки возбуждения приближенно можно найти как:

$$R_f = \frac{U_{fn} - \Delta U_{fn}}{I_{fn}} = \frac{0,7 \cdot U_{fn}}{I_{fn}}.$$

Для того чтобы найти активное сопротивление обмотки возбуждения в относительных единицах находится базисное сопротивление цепи возбуждения  $Z_f^{баз}$ , но для этого сначала определяется ЭДС обмотки возбуждения в номинальном режиме  $E_{fn}^*$ :



$$E_{fH}^* = \sqrt{1 - \left(\frac{M_H}{M_M}\right)^2} + X_d \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_H}{M_M}\right)^2} \cdot \frac{1}{X_q^2},$$

$$Z_f^{\sigma_{az}} = \frac{\sqrt{3} U_H I_H (E_{fH}^*)^2}{I_{fH}^2 (X_{md}^*)^2}.$$

Сопротивление обмотки возбуждения в относительных единицах рассчитывается по формуле:

$$R_f^* = \frac{R_f}{Z_f^{\sigma_{az}}}.$$

Активное сопротивление обмотки статора  $R_s$  можно определить, приняв допущение, что потери в меди статора в номинальном режиме составляют 25–30% от общих потерь:

$$R_s \cong 0,25 \cdot (1 - \eta_H).$$

С учетом несимметрии ротора по осям принимается:

$$m_q^{\pi} \cong 1,2 \cdot M_{\pi} \eta_H \cos \phi_H,$$

$$i_{sq}^{\pi} = 0,8 \cdot I_{\pi}.$$

Входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $q$  теперь определяются по следующим формулам:

$$R_{exq}^{s=1} = R_s + \frac{m_q^{\pi}}{(i_{sq}^{\pi})^2},$$

$$X_{exq}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sq}^{\pi}}\right)^2 - \left(R_{exq}^{s=1}\right)^2}.$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $q$  рассчитываются по формулам:

$$R_{rmq}^{s=1} = R_{exq}^{s=1} - R_s,$$

$$X_{rmq}^{s=1} = X_{exq}^{s=1} - X_{\sigma s}.$$

Проводимости пусковой обмотки по оси  $q$  могут быть определены по следующим формулам:

$$g_{rq} = \frac{R_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1} + X_{rmq}^{s=1}},$$

$$b_{rq} = \frac{X_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1} + X_{rmq}^{s=1}} - \frac{1}{X_{mq}}.$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $q$  на основе известных проводимостей рассчитываются по формулам:

$$R_{rq} = \frac{g_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} \cdot s,$$

$$X_{\sigma rq} = \frac{b_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2}.$$

Аналогичным образом рассчитываются сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$ . Для этого сначала рассчитываются входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $d$ :

$$R_{\text{exd}}^{s=1} = R_s + \frac{m_d^n}{(i_{sd}^n)^2},$$

$$X_{\text{exd}}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sd}^n}\right)^2 - \left(R_{\text{exd}}^{s=1}\right)^2}.$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $d$  составляет:

$$R_{rmdf}^{s=1} = R_{\text{exd}}^{s=1} - R_s,$$

$$X_{rmdf}^{s=1} = X_{\text{exd}}^{s=1} - X_{\sigma s}.$$

Проводимости и сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  синхронного двигателя определяются по формулам:

$$g_{rd} = \frac{R_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{R_f}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2},$$

$$b_{rd} = \frac{X_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{X_{\sigma f}}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} - \frac{1}{X_{md}}.$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  на основе известных проводимостей могут быть рассчитаны по формулам:

$$R_{rd} = \frac{g_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} \cdot s,$$

$$X_{ord} = \frac{b_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2}.$$

Математическая модель явнополюсного синхронного двигателя в фазных координатах строится аналогично математической модели асинхронного двигателя, показанной в п. 2.1, но отличается тем, что подматрица индуктивностей статор-статор  $L_{S-S}$  зависит от угла положения ротора  $\gamma$  и система дифференциальных уравнений ротора дополняется уравнением для обмотки возбуждения и система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} pI_S \\ pI_R \end{bmatrix} &= L(\gamma)^{-1} \cdot \left[ \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \right] \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{T_j} \left[ M_{\text{вп}}(i, \psi) - M_c(\omega) \right], \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (2.17)$$

Выражение для определения противо-ЭДС синхронного двигателя имеет вид:

$$\xi_{CD} = E_S(\gamma) + L_{S-R}(\gamma) \cdot \tilde{L}_{R-R} \cdot [U_R - R_R \cdot I_R - E_R(\gamma)],$$

где:

$$E_S(\gamma) = \omega \cdot \left( \frac{dL_{S-S}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_S + \frac{dL_{S-R}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_R \right),$$

$$E_R(\gamma) = \omega \cdot \frac{dL_{R-S}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_S.$$

### 2.3 Определение параметров схемы замещения и математическая модель неявнополюсного синхронного двигателя

Конструктивной особенностью неявнополюсных синхронных двигателей является то, что они выполняются с одной парой полюсов и имеют номинальную скорость вращения 3000 оборотов в минуту, а их ротор представляет собой массивную поковку с выфрезированными пазами, в которые заложены стержни обмотки возбуждения. Эта поковка массивного ротора выполняет также функции демпферных (успокоительных) контуров, повышающих устойчивость синхронной машины в переходных режимах.

Как правило, в каталогах для такого типа двигателей приводятся зависимости от скольжения среднего пускового вращающего момента и тока статора при замкнутой накоротко обмотке возбуждения, а также параметры обмотки статора  $R_s$  и  $X_{\sigma s}$ , обмотки возбуждения  $R_f$  и  $X_{\sigma f}$ , индуктивное сопротивление рассеяния взаимоиндукции  $X_{md}$ , а также номинальная мощность  $P_H$ , номинальные ток  $I_H$  и напряжение  $U_H$  статора, номинальный ток обмотки возбуждения  $I_{fH}$ , КПД и  $\cos\varphi_H$ .

Ввиду практически полной магнитной симметрии тела ротора неявнополюсного синхронного двигателя можно считать, что параметры эквивалентного демпферного массива одинаковыми по любой оси. Поэтому схемы замещения по осям  $d$  и  $q$  будут отличаться лишь наличием по оси  $d$  контура цепи возбуждения. При этом в целом схема замещения будет подобна показанной на рисунке 2.2 для синхронного явнополюсного двигателя, однако в ней сопротивления ротора будут функциями скольжения.

Активное сопротивление обмотки возбуждения в каталоге задают обычно для температуры  $15^{\circ}\text{C}$ , поэтому его сначала необходимо пересчитать к принимаемой за среднюю температуру равную  $75^{\circ}\text{C}$ , а затем привести к базисным единицам, как это было показано в п. 2.2.

Активные и индуктивные сопротивления обмотки ротора по осям  $d$  и  $q$  для любого значения скольжения определяются по известным входным

сопротивлениям двигателя для заданного значения скольжения. Расчетные значения активного и индуктивного входных сопротивлений двигателя определяются как:

$$R_{BX}^{pac}(s) = R_s + 0.5 \cdot (\operatorname{Re}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Re}(Z_{2q}(s))), \quad (2.18)$$

$$X_{BX}^{pac}(s) = X_{\sigma s} + 0.5 \cdot (\operatorname{Im}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Im}(Z_{2q}(s))). \quad (2.19)$$

где:

$$Z_{2d}(s) = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_{md}} + \frac{1}{\frac{R_f}{s} + j \cdot X_{\sigma f}} + \frac{1}{\frac{R_{rd}(s)}{s} + j \cdot X_{\sigma rd}(s)}},$$

$$Z_{2q}(s) = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_{mq}} + \frac{1}{\frac{R_{rq}(s)}{s} + j \cdot X_{\sigma rq}(s)}}.$$

С другой стороны, используя известные каталожные данные, активное и индуктивное входные сопротивления двигателя, могут быть определены как:

$$R_{BX}^{kam}(s) = R_s + M_{\Pi}(s) \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H \cdot \frac{1}{I_{\Pi}^2}, \quad (2.20)$$

$$X_{BX}^{kam}(s) = \sqrt{\frac{1}{I_{\Pi}^2} - R_{BX}^{kam}(s)^2}. \quad (2.21)$$

Между активными и индуктивными сопротивлениями ротора по осям  $d$  и  $q$  существуют соотношения, в которых значения коэффициентов  $C_R$  и  $C_X$  близки к единице и практически одинаковые для всех значений скольжения:

$$R_{rq} = C_R \cdot R_{rd},$$

$$X_{\sigma rq} = C_X \cdot X_{\sigma rd}.$$

Поскольку значения коэффициентов  $C_R$  и  $C_X$  близки к единице, то можно принять следующие допущения:

$$R_{rq}(s) = R_{rd}(s) = R_K(s), \quad (2.22)$$

$$X_{\sigma rq}(s) = X_{\sigma rd}(s) = X_K(s), \quad (2.23)$$

$$X_{mq} = X_{md} = X_{mf}. \quad (2.24)$$

С учетом допущений (2.22) – (2.24) количество неизвестных в уравнениях (2.18) и (2.19) сокращается до двух и, используя эти выражения для каждого скольжения можно найти входные сопротивления по каталожным данным (2.20) и (2.21). При этом система алгебраических уравнений с двумя неизвестными  $R_K(s)$  и  $X_K(s)$  для каждой точки скольжения будет иметь вид:

$$f_R(R_K(s), X_K(s)) = R_{BX}^{kam}(s) - R_S - 0.5 \cdot (\operatorname{Re}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Re}(Z_{2q}(s))), \quad (2.25)$$

$$f_X(R_K(s), X_K(s)) = X_{BX}^{kam}(s) - X_{\sigma S} - 0.5 \cdot (\operatorname{Im}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Im}(Z_{2q}(s))). \quad (2.26)$$

Система нелинейных алгебраических уравнений (2.25), (2.26) может быть решена одним из численных методов из условия минимизации целевой функции:

$$f_{\min}(R_K(s), X_K(s)) = f_R^2(R_K(s), X_K(s)) + f_X^2(R_K(s), X_K(s)).$$

Эти же значения параметров контуров ротора  $R_K(s)$  и  $X_K(s)$  вместо решения нелинейной системы алгебраических уравнений могут быть определены по аналитическому выражению:

$$Z_K(Z_S, Z_m, Z_f, Z_{BX}, s) = \frac{Z_f \cdot (Z_S - Z_{BX}) + 0.5 \cdot Z_m \cdot (Z_S - Z_{BX} + Z_f - \sqrt{(Z_S - Z_{BX})^2 - Z_f^2})}{(Z_{BX} - Z_S - 0.5 \cdot Z_m) + Z_m^{-1} \cdot Z_f \cdot (Z_{BX} - Z_S - Z_m)} \quad (2.27)$$

где:

$$Z_S = R_S + j \cdot X_{\sigma S},$$

$$Z_m = j \cdot X_{md},$$

$$Z_f = \frac{R_f}{s} + j \cdot X_{\sigma f},$$

$$Z_{BX} = R_{BX}^{kam}(s) + j \cdot X_{BX}^{kam}(s).$$

Полученные данные нелинейных зависимостей активных и индуктивных сопротивлений ротора в результате расчётов по формулам (2.25) – (2.27) для удобства могут быть аппроксимированы, например кубическими сплайнами, что в дальнейшем позволяет использовать их при расчете статических и динамических характеристик.

Математическая модель неявнополюсного синхронного двигателя аналогична математической модели явнополюсного синхронного двигателя, которая описывается системой уравнений (2.17).

#### 2.4 Определение параметров схемы замещения и математическая модель силового трансформатора

Как правило, параметры схемы замещения силового трансформатора (Рисунок 2.3) определяют на основе его каталожных данных, к которым относятся: его номинальная мощность  $S_H$ , номинальное напряжение обмотки высшего  $U_{BH}$  и низшего  $U_{HH}$  напряжения, мощность  $\Delta P_K$  и напряжение короткого  $U_K$  замыкания, мощность  $\Delta P_X$  и ток  $I_X$  холостого хода.

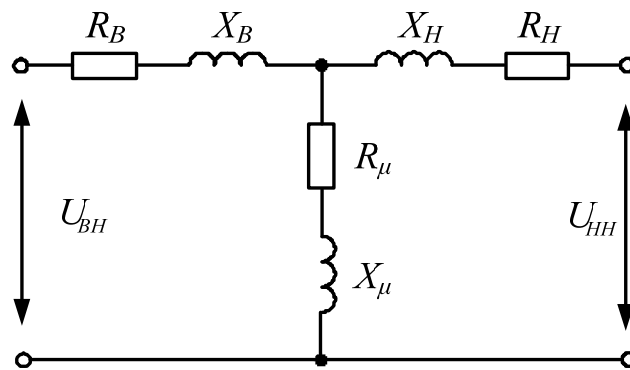


Рисунок 2.3 – Схема замещения силового трансформатора

Из схемы замещения определяется активное сопротивление первичной обмотки по данным опыта короткого замыкания по формуле:

$$R_K = \frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_H^2},$$

где:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{BH}}.$$

Полное сопротивление короткого замыкания определяется по выражению:

$$Z_K = \frac{U_K \cdot U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot 100}.$$

Зная полное и активное сопротивление короткого замыкания индуктивное сопротивление короткого замыкания рассчитывается по формуле:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

Приведенные к одной ступени напряжения активное и индуктивное сопротивления обмоток высшего и низшего напряжения для двухобмоточного трансформатора можно принять одинаковыми. Тогда фазные сопротивления обмоток высшего и низшего напряжения с учетом коэффициента трансформации рассчитываются по формулам:

$$R_B = \frac{1}{2} \cdot R_K,$$

$$R_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_K}{K_T^2},$$

$$X_B = \frac{1}{2} \cdot X_K,$$

$$X_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_K}{K_T^2},$$

где:  $K_T$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Если на стороне низшего напряжения трансформатора имеются две расщепленные обмотки, тогда индуктивное сопротивление обмоток высшего и низшего напряжения можно определить по формулам:

$$X_B = 0,125 \cdot X_K,$$

$$X_H = 0,875 \cdot \frac{X_K}{K_T^2}.$$

Из опыта холостого хода активное сопротивление рассчитывается как:

$$R_X = \frac{\Delta P_X}{3 \cdot \left(\frac{I_X}{100} \cdot I_H\right)^2}.$$

Полное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода определяется по формуле:

$$Z_X = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{I_X}{100} \cdot I_H\right)}.$$



Тогда индуктивное сопротивление в режиме холостого хода рассчитывается по формуле:

$$X_X = \sqrt{Z_X^2 - R_X^2}.$$

Активное сопротивление ветви намагничивания определяется следующим образом:

$$R_\mu = R_X - R_k.$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания определяется как:

$$R_\mu = R_X - R_k.$$

Математическая модель двухобмоточного трёхфазного силового трансформатора в фазных координатах и с учетом потерь в стали описывается системой дифференциальных уравнений, записанных в матричной форме, которая имеет вид:

$$pi = L^{-1} \cdot (U - R \cdot i - E_\mu)$$

где:

$$L = \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & L_\mu & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 & 0 & L_\mu & 0 \\ 0 & 0 & L_C & 0 & 0 & L_\mu \\ L_\mu & 0 & 0 & L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_\mu & 0 & 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_\mu & 0 & 0 & L_c \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} R_A + R_{\mu BH} & 0 & 0 & R_\mu & 0 & 0 \\ 0 & R_B + R_{\mu BH} & 0 & 0 & R_\mu & 0 \\ 0 & 0 & R_C + R_{\mu BH} & 0 & 0 & R_\mu \\ R_\mu & 0 & 0 & R_a + R_{\mu HH} & 0 & 0 \\ 0 & R_\mu & 0 & 0 & R_b + R_{\mu HH} & 0 \\ 0 & 0 & R_\mu & 0 & 0 & R_c + R_{\mu HH} \end{bmatrix},$$

$$E_\mu = \begin{bmatrix} R_{\mu A} \cdot (i_A + i_a \cdot K_T^{-1}) \\ R_{\mu B} \cdot (i_B + i_b \cdot K_T^{-1}) \\ R_{\mu C} \cdot (i_C + i_c \cdot K_T^{-1}) \\ R_{\mu a} \cdot (i_a + i_A \cdot K_T) \\ R_{\mu b} \cdot (i_b + i_B \cdot K_T) \\ R_{\mu c} \cdot (i_c + i_C \cdot K_T) \end{bmatrix},$$

$$U = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_a - U_b \\ U_b - U_c \\ U_c - U_a \end{bmatrix},$$

$$i = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}.$$

В приведенных формулах  $L_A, L_B, L_C, L_a, L_b, L_c$  – индуктивности обмоток трансформатора,  $L_\mu$  – индуктивность ветви намагничивания,  $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  – активные сопротивления обмоток трансформатора,  $R_\mu$  – активное сопротивление ветви намагничивания,  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  – токи в обмотках трансформатора  $U_A, U_B, U_C, U_a, U_b, U_c$  – напряжения обмоток трансформатора,  $K_T$  – коэффициент трансформации,  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования,

## 2.5 Выводы по разделу 2.

1. Для проведения анализа переходных процессов в многомашинных системах электроснабжения в режимах работы устройств БАВР разработаны математические модели трансформаторов, асинхронных и синхронных двигателей. Математические модели электродвигателей представлены системами дифференциальных уравнений, записанными в матричной форме, в которых токи

статоров представлены в трехфазной системе координат, а токи роторов в двухфазной с учетом зависимости потокоцеплений и индуктивностей электродвигателя от угла положения ротора.

2. Полученные системы дифференциальных уравнений асинхронного и синхронного электродвигателей позволяют учесть эффект вытеснения тока в роторе, а использование трехфазной системы координат позволяет выполнить моделирование как симметричных так и несимметричных режимов работы электродвигателей в ходе исследования процессов, относящихся к процедуре защитного отключения и последующего автоматического включения резервного напряжения питания многомашинного электромеханического комплекса.

3. Для определения параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного электродвигателя разработан метод идентификации параметров, в котором в отличие от известных учёт потерь в стали осуществляется с помощью короткозамкнутого контура, аналогично роторным контурам.

4. Приведены методики определения параметров эквивалентных схем замещения явнополюсных и неявнополюсных синхронных электродвигателей, силовых трансформаторов на основе известных каталожных данных.

## РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОМАШИННОГО  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АДАПТИРОВАННОЙ К  
ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ  
ВКЛЮЧЕНИИ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ3.1 Выбор общей системы координат для математической модели системы  
электрообеспечения многомашинного электромеханического комплекса

В современных электрических системах при проектировании и вводе в эксплуатацию нового силового оборудования и микропроцессорных устройств защиты и автоматики требуются расчеты режимов коротких замыканий, отключений и повторных включений линий и трансформаторов, оценка устойчивости и поведения двигательной нагрузки при перерывах питания.

Применяемые для этой цели математические модели, основанные на использовании для электрических машин сверхпереходных сопротивлений и ЭДС [93] или упрощенных дифференциальных уравнений [94], не позволяют получить с требуемой точностью мгновенные значения токов, напряжений, динамических моментов, мощностей и других параметров элементов сети. Это связано с тем, что турбогенераторы электрических систем, а также применяемые в узлах нагрузки асинхронные и синхронные двигатели большой единичной мощности с массивным или глубокопазым ротором, требуют использования уточненных математических моделей, учитывающих явления вытеснения токов, насыщения магнитных цепей и др.

В известных математических моделях многомашинных электромеханических систем (ММЭС) [95, 96] используют дифференциальные уравнения электрических машин без учета явления вытеснения токов в роторе, оказывающего определяющее влияние на характер переходных процессов. Кроме того, дифференциальные уравнения для отдельных элементов системы записывают в различных системах координат:  $d, q$  – для синхронных машин,  $\alpha, \beta$  –

для асинхронных машин,  $a, b, c, 0$  – для линий электропередач, нагрузок, трансформаторов. Преимущества такой записи уравнений при исследовании переходных процессов в отдельно взятых элементах теряются в моделях многомашинных систем электроснабжения, так как для определения узловых напряжений (контурных токов) требуется приведение большей части переменных к единой для всех элементов системы координат с учетом топологии сети. Возникают также затруднения при моделировании несимметричных режимов, коммутаций силовых цепей при действии релейной защиты и автоматики и др. Как следует из [97], актуальными являются также методы сокращения расчетных затрат в математических моделях многомашинных систем электроснабжения.

### 3.2 Обоснование структуры и параметров универсальной схемы замещения элементов сети в переходных режимах и их математические модели

Для того, чтобы составить математическую модель представим, что к узлам электрической системы с напряжениями  $u_A, u_B, u_C$  подключена активно-индуктивная нагрузка (Рисунок 3.1), которая находится в режиме генерации или потребления.

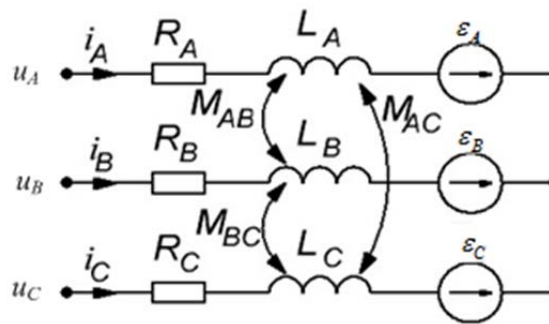


Рисунок 3.1 – Универсальная схема замещения активно-индуктивной нагрузки

Дифференциальные уравнения такой нагрузки в матричной форме записи имеют вид:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U - R \cdot I - \varepsilon, \quad (3.1)$$

где:  $R, L, I, U, \varepsilon$  – соответственно матрицы активных сопротивлений фаз, фазных и межфазных индуктивностей, векторы фазных токов, узловых напряжений, против-ЭДС, которые имеют вид:

$$R = \text{diag}[R_A, R_B, R_C]^{\text{tr}},$$

$$L = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix},$$

$$I = [i_A, i_B, i_C]^{\text{tr}},$$

$$U = [u_A, u_B, u_C]^{\text{tr}},$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C]^{\text{tr}},$$

В многузловых схемах, содержащих такие нагрузки, узловые напряжения при известных параметрах  $R_i, L_i, \varepsilon_i$  для  $i$ -тых ветвей и с помощью топологической матрицы соединений  $T$  (узлы-ветви) определяются, согласно [98], из уравнения:

$$U_{uzl} = (T \cdot L_i^{-1} \cdot T^{\text{tr}})^{-1} \cdot T \cdot L^{-1} \cdot (R_i \cdot I_i + \varepsilon_i).$$

Для того чтобы упростить формирование математической модели многомашинной системы электроснабжения представим статорные цепи асинхронной и синхронной машин подобно нагрузке, показанной на рисунке 3.1. Для этого необходимо получить из дифференциальных уравнений выражения для эквивалентных индуктивностей и против-ЭДС.

С целью представления статорной цепи синхронного двигателя для внешней схемы в виде уравнения (3.1) запишем систему дифференциальных уравнений синхронной машины, выбрав в качестве переменных состояния токи обмоток статора и ротора в естественных координатах. Тогда с учетом зависимости потокоцеплений и индуктивностей обмоток от угла положения ротора  $\gamma$  система уравнений примет вид:

$$\begin{bmatrix} L_{SS}(\gamma) & L_{SR}(\gamma) \\ L_{RS}(\gamma) & L_{RR}(\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_S}{dt} \\ \frac{dI_R}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \begin{bmatrix} \frac{dL_{SS}(\gamma)}{d\gamma} & \frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma} \\ \frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma} & \frac{dL_{RR}(\gamma)}{d\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix},$$

Из решения полученной системы уравнений можно определить выражение для производных от токов статора:

$$\frac{dI_S}{dt} = L_S(\gamma)^{-1} \cdot [U_S - R_S \cdot I_S - \varepsilon(\gamma)],$$

где:  $\varepsilon(\gamma)$  – противо-ЭДС двигателя,

$L_S(\gamma)$  – входная индуктивность машины со стороны статорной цепи

Противо-ЭДС двигателя определяется по формуле:

$$\varepsilon(\gamma) = \omega \left( \frac{dL_{SS}(\gamma)}{d\gamma} I_S + \frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma} I_R \right) + L_{SR}(\gamma) \cdot L_{RR}^{-1} \cdot \left[ U_R - R_R I_R - \omega \frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma} I_S \right]. \quad (3.2)$$

Входная индуктивность машины со стороны статорной цепи  $L_S(\gamma)$  равна:

$$L_S(\gamma) = L_{SS}(\gamma) - L_{SR}(\gamma) \cdot L_{RR}^{-1} \cdot L_{RS}(\gamma). \quad (3.3)$$

В выражениях (3.2) – (3.3)  $L_{SS}(\gamma)$ ,  $L_{SR}(\gamma)$ ,  $L_{RR}(\gamma)$ ,  $L_{RS}(\gamma)$  подматрицы общей матрицы индуктивностей  $L(\gamma)$  синхронной машины,  $R_S$  и  $R_R$  матрицы активных сопротивлений статора и ротора соответственно,  $\frac{dL_{SS}}{d\gamma}$ ,  $\frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma}$ ,  $\frac{dL_{RR}}{d\gamma}$ ,  $\frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma}$  подматрицы производных от матрицы индуктивностей  $\frac{dL}{d\gamma}$ ,  $I_S$  и  $I_R$  векторы фазных токов статора и ротора,  $U_S$  и  $U_R$  векторы напряжений обмоток статора и ротора,  $\omega$  – скорость вращения ротора.

Для представления асинхронной машины в виде нагрузки, представленной на рисунке 3.1, справедливы уравнения (3.2) и (3.3), полученные для синхронной машины, но с учётом того, что вектор напряжения ротора равен 0, а подматрица  $L_{SS}$  не зависит от угла положения ротора и ее производная равна нулю. Также необходимо исключить уравнение, соответствующее уравнению обмотки возбуждения синхронной машины.

Математическая модель линий электропередач, кабелей, нагрузки активно-индуктивного характера и шунтов короткого замыкания в матричной форме, записанная для трехфазной системы координат имеет вид:

$$p\dot{i} = L^{-1} \cdot (U - R \cdot i).$$

где:  $i$  – вектор токов,

$U$  – вектор напряжений питающей электрической системы,

$R$  – матрица активных сопротивлений,

$L^{-1}$  – обратная матрица индуктивностей.

Таким образом, объединив математические модели отдельных элементов с помощью топологической матрицы соединений, получим математическую модель многомашинной системы электроснабжения любой конфигурации и сложности, в которой дифференциальные уравнения всех её элементов записаны в трехфазной системе координат и представлены в одном виде для всех элементов.

### 3.3 Математическая модель устройства БАВР

Для узлов энергосистем с синхронными и асинхронными электродвигателями для сохранения непрерывности технологического процесса должны быть предусмотрены устройства БАВР, способные выявить нарушение электроснабжения за минимально возможное время и обеспечить дальнейшую синфазную подачу резервного питания с помощью силовых коммутационных аппаратов. Для проверки эффективности и надежности работы устройств БАВР в различных схемах целесообразно применять математическое моделирование работы непосредственно самих устройств БАВР в аварийных режимах.

#### 3.3.1 Обоснование принципа обработки входных сигналов токов и напряжений

Как правило, аналоговые сигналы от измерительных трансформаторов тока и напряжения поступают в аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) микропроцессорных устройств, в которых преобразуются в цифровые дискретные значения с временным шагом дискретности  $h$ . Для построения алгоритмов микропроцессорных защит и противоаварийной автоматики необходимо из этих дискретных значений измеряемых токов и напряжений выделить первую гармоническую составляющую промышленной частоты и представить её в виде



векторной величины, т.е. определить для неё амплитуду и начальную фазу или две ортогональные составляющие.

Традиционные подходы к формированию векторных (синусоидальных) величин (амплитуды и фазы) на основе мгновенных значений входного сигнала основываются на интервале наблюдения равном одному периоду промышленной частоты и на разложении входного сигнала с помощью интеграла Фурье [99].

Такой подход позволяет обеспечить частотную фильтрацию и устранить аддитивные помехи в виде белого шума, но не позволяет обеспечить высокое быстродействие. Также известны алгоритмы для определения векторных величин, основанные на фиксации мгновенных значений сигнала в дискретные моменты времени и определении по одной или двум выборкам амплитуды и фазы предполагаемого синусоидального сигнала [99], имеющие более высокое быстродействие, но низкую помехоустойчивость.

Таким образом, требуется разработка алгоритма, обладающего как относительно высоким быстродействием, так и высокой помехоустойчивостью.

Аналоговые токи и напряжения поступают от трансформаторов тока и напряжения и после предварительной фильтрации и обработки в аналогово-цифровых преобразователях поступают в виде цифровых дискретных значений в буфер памяти. По этим значениям требуется сформировать с синусоидальным характером изменения сигналы токов и напряжений, т.е. требуется представить их в виде векторных величин для чего необходимо определить их амплитуды и начальные фазы при известной круговой частоте сети.

Одним из способов решения этой задачи является использование двух выборок мгновенных значений измеряемого сигнала для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , разность между которыми равна шагу дискретизации  $h = \Delta t$  (Рисунок 3.2):

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= Xm \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi) \\ x_2 &= Xm \cdot \sin(\omega t_2 + \varphi) \end{aligned} \right\}. \quad (3.4)$$

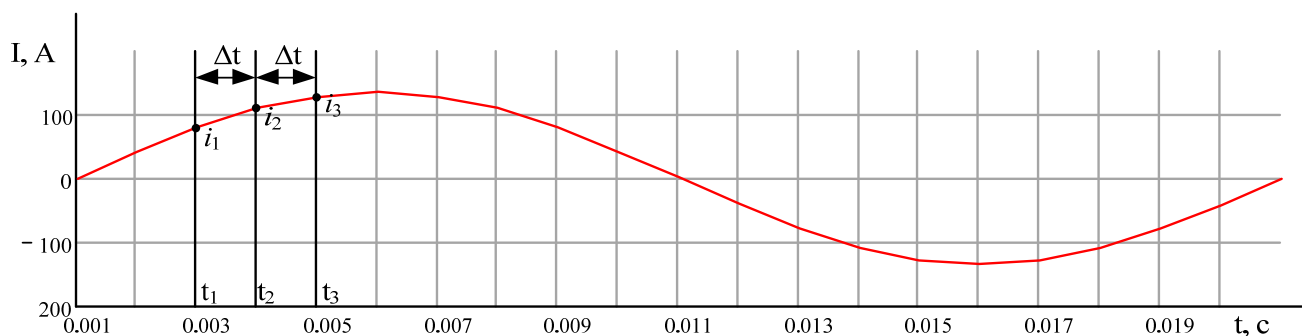


Рисунок 3.2 – Диаграмма к иллюстрации процесса дискретного измерения  
фазного тока асинхронного двигателя

Из решения системы уравнений (3.4), учитывая что  $t_2 = t_1 + h$ , найдем выражения для определения амплитуды  $X_m$  измеряемого сигнала и его начальной фазы:

$$X_m = \frac{1}{\sin(\omega \cdot h)} \cdot \sqrt{x_1^2 - 2 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \cos(\omega \cdot h) + x_2^2}, \quad (3.5)$$

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{x_1 \cos(\omega t_2) - x_2 \cos(\omega t_1)}{x_1 \sin(\omega t_2) - x_2 \sin(\omega t_1)} \right]. \quad (3.6)$$

Тогда с учетом (3.5) и (3.6) измеряемый сигнал в векторной или комплексной форме для мгновенных величин может быть представлен как:

$$\underline{X(t)} = |X_m| \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi)} = X_m \cos(\omega \cdot t + \varphi) + jX_m \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

Результаты обработки входного сигнала по этому алгоритму показаны на рисунке 3.3. В качестве измеряемого сигнала были использованы значения тока фазы А асинхронного двигателя, из которых были получены синусная и косинусная составляющие, а также амплитуда и фаза преобразованного сигнала. При этом шаг расчета был принят равным  $h=0.001$  сек.

Из рисунка 3.3 видно, что приведенный алгоритм обладает низкой помехоустойчивостью. Для повышения его помехоустойчивости амплитуду и начальную фазу измеряемого сигнала более целесообразно находить как усредненные по данным нескольких измерений [93].

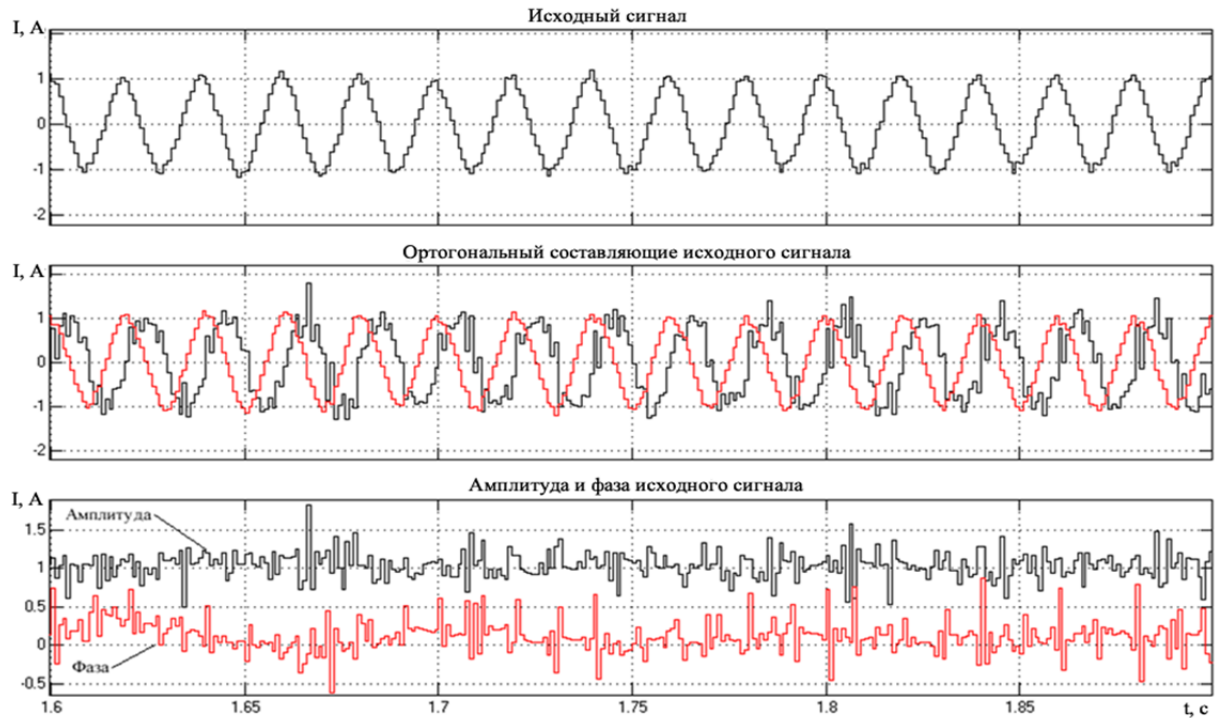


Рисунок 3.3 – Результаты применения алгоритма векторного представления исходного сигнала по двум выборкам мгновенных значений тока в процессе компьютерного моделирования

Количество измерений при таком подходе примем нечетным, а значения амплитуды  $X_m$  и начальной фазы  $\varphi$  будем находить для центральных точек. Так, например, при шаге дискретизации  $h$  и при пяти измеренных  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ ,  $x(t_3)$ ,  $x(t_4)$ ,  $x(t_5)$  мгновенных значениях входного сигнала амплитуда  $X_m$  и начальная фаза  $\varphi$ , исходя из выражений (3.5) и (3.6), определяются по формулам:

$$X_m = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sqrt{x(t_2)^2 - 2x(t_2)x(t_4)\cos(2h) + x(t_4)^2}}{\sin(2h)} + \frac{\sqrt{x(t_1)^2 - 2x(t_1)x(t_5)\cos(4h) + x(t_5)^2}}{\sin(4h)} \right], \quad (3.7)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[ \arctg \left[ \frac{x(t_4)\cos(\omega t_2) - x(t_2)\cos(\omega t_4)}{x(t_4)\sin(\omega t_2) - x(t_2)\sin(\omega t_4)} \right] + \arctg \left[ \frac{x(t_5)\cos(\omega t_1) - x(t_1)\cos(\omega t_5)}{x(t_5)\sin(\omega t_1) - x(t_1)\sin(\omega t_5)} \right] \right]. \quad (3.8)$$

Осциллограммы токов, полученные с помощью указанного алгоритма для того же исходного сигнала как на рисунке 3.3, показаны на рисунке 3.4.

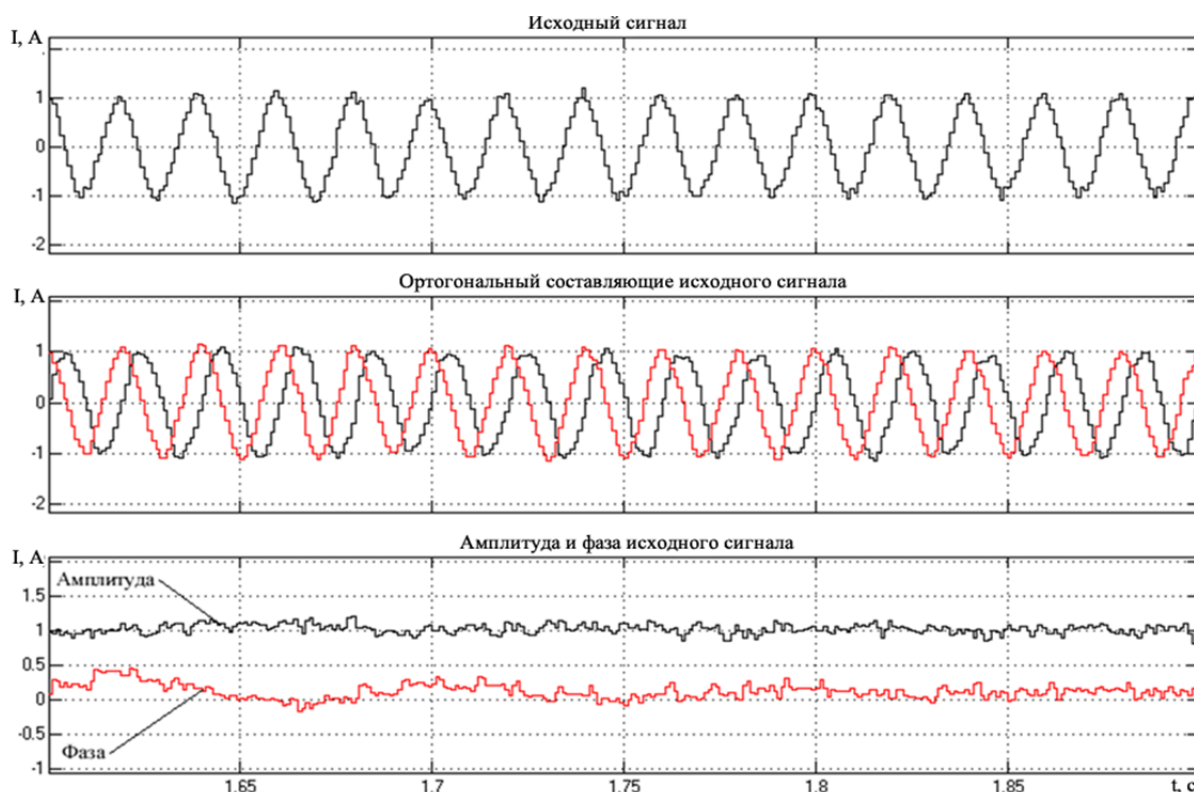


Рисунок 3.4 – Результаты применения алгоритма по выражениям (3.7), (3.8) в процессе компьютерного моделирования

Результаты применения формул (3.7) и (3.8), приведенные на рисунке 3.4, показывают, что данный алгоритм обладает лучшими фильтрующими свойствами благодаря тому, что усреднение выполняется относительно центральной точки интервала наблюдения. Кроме того, данный алгоритм характеризуется сравнительно высоким быстродействием выполнения, поскольку для определения ортогональных составляющих входного сигнала необходимо всего пять измерений с относительно небольшим шагом дискретизации  $h$ , значение которого может быть принято, например, равным 0.0005-0.001 секунды.

Известен еще один подход к формированию ортогональных составляющих измеряемого сигнала, основанный на использовании мгновенных значений измеряемого сигнала  $x(t)$  и их производных  $x'(t)$ :

$$x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi),$$

$$x'(t) = \omega X_m \cos(\omega t + \varphi).$$

В этом случае амплитуда  $X_m$ , начальная фаза  $\varphi$  и комплексное выражение

для измеряемого сигнала определяются как:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{x'(t)}{\omega}\right)^2 + x^2(t)}, \quad (3.9)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot x(t)}{x'(t)}\right), \quad (3.10)$$

$$\underline{X(t)} = |X_m| \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi)} = \frac{x'(t)}{\omega} + jx(t). \quad (3.11)$$

В данном случае требуется численное определение производной  $x'(t)$  по мгновенным значениям измеряемого сигнала. Для численного определения производной лучше всего использовать три или более текущих выборок измеряемого сигнала, взятых через одинаковые промежутки времени. При этом большей точностью будут обладать центральные производные, в которых используется нечетное количество выборок. При численном определении центральных производных для трех ( $n=3$ ) и пяти ( $n=5$ ) выборок могут быть использованы формулы:

$$x'(t) = \frac{1}{2h}(x(t_3) - x(t_1)), \quad (3.12)$$

$$x'(t) = \frac{1}{12h}(x(t_1) - 8 \cdot x(t_2) + 8 \cdot x(t_4) - x(t_5)). \quad (3.13)$$

Поскольку по формулам (3.12) и (3.13) определяются центральные производные для моментов времени  $t_2$  или  $t_3$ , то для этих же моментов времени требуется использовать усреднённые значения измеряемого сигнала из тех же трех или пяти выборок, что дополнительно позволит ослабить влияние случайных помех. Результаты работы такого алгоритма определения ортогональных составляющих показаны на рисунке 3.5 для трех выборок и на рисунке 3.6 для пяти выборок измеряемого сигнала.

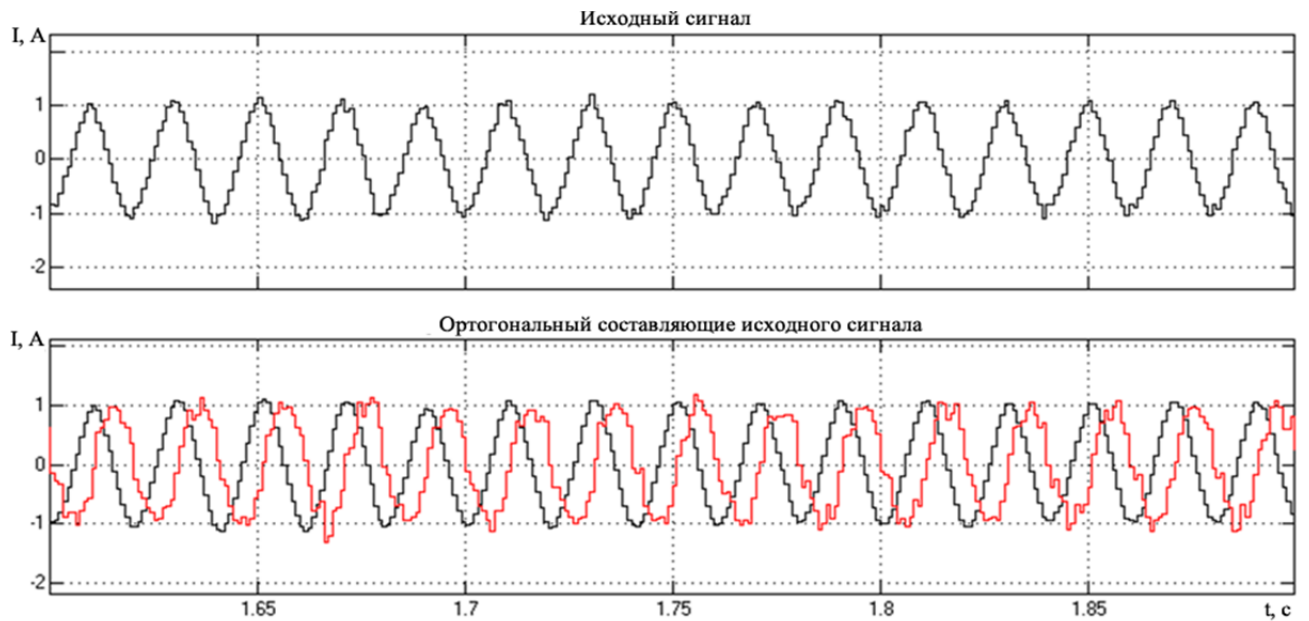


Рисунок 3.5 – Результаты получения ортогональных составляющих по трем выборкам измеряемого сигнала и его производным в процессе компьютерного моделирования

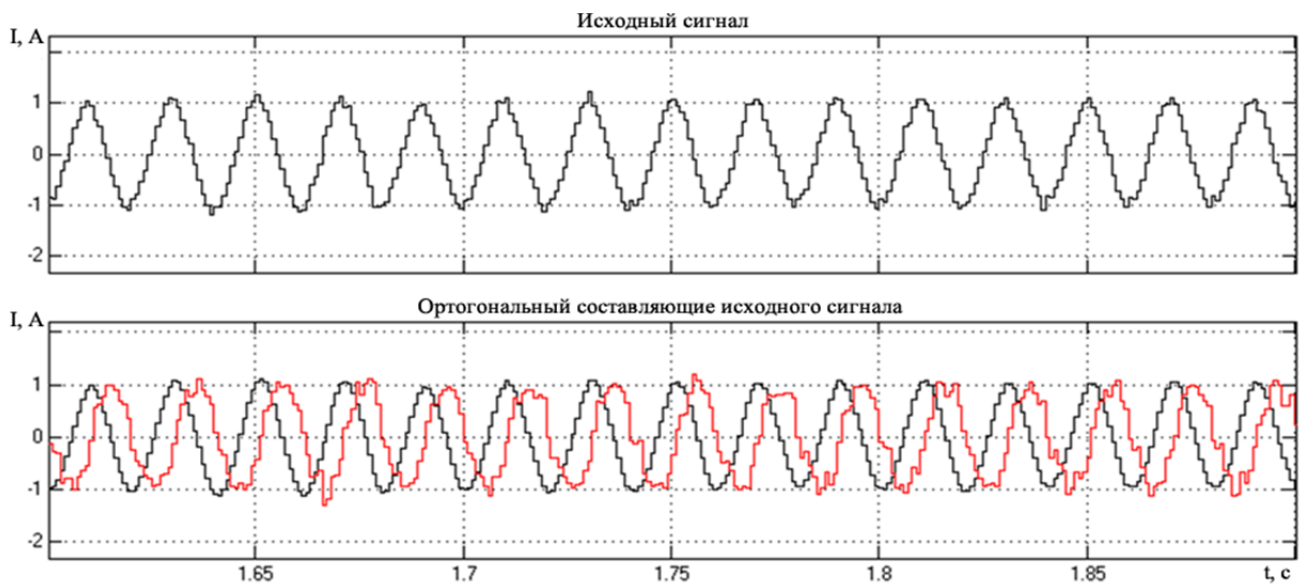


Рисунок 3.6 – Результаты получения ортогональных составляющих по пяти выборкам измеряемого сигнала и его производным в процессе компьютерного моделирования

Так как операция численного дифференцирования отличается меньшей точностью от операции интегрирования, то для повышения точности вычисления

более целесообразно сначала определить усреднённое значение измеряемого сигнала для середины интервала по трем или пяти выборкам:

$$i(t_3) = \frac{1}{A_n} (i(t_1) + i(t_2) + i(t_3) + i(t_4) + i(t_5))$$

где:  $A_n$  – коэффициент усреднения.

Такое усреднение позволяет выполнить фильтрацию и снизить уровень влияния случайных помех. В связи с тем, что выборки берутся с одинаковым шагом дискретизации  $h$ , а синусоидальная функция является нелинейной, то коэффициент для усреднения определятся как отношение суммы всех  $n$  выборок измеряемого сигнала к центральной выборке измеряемого сигнала по формуле:

$$A_n = \frac{\sum_{r=0}^{n-1} \sin(\omega \cdot (t_1 + h \cdot r) + \varphi)}{\sin(\omega \cdot (t_1 + h \cdot \frac{n-1}{2}) + \varphi)}. \quad (3.14)$$

Как видно из (3.14), коэффициент усреднения  $A_n$  зависит от частоты  $\omega$ , длины шага  $h$  и количества выборок  $n$ . Так, например, для  $\omega = 314$  рад,  $h = 0.0005$  секунды для  $n=3, 5, 7$  из (3.14) получим  $A_3=2.975$ ,  $A_5= 4.878$ ,  $A_7=6.66$ . Если же шаг принять  $h=0.001$  секунды, тогда получим  $A_3=2.902$ ,  $A_5= 4.521$ ,  $A_7=5.697$ . Без уточненного усреднения эти коэффициенты были бы соответственно равны  $A_3=3$ ,  $A_5=5$ ,  $A_7=7$ .

После преобразований из (3.14), можно также получить следующие выражения для коэффициентов  $A$ :

$$A_3 = 1 + 2 \cdot \cos(\omega \cdot h),$$

$$A_5 = 1 + 2 \cdot (\cos(\omega \cdot h) + \cos(2\omega \cdot h)),$$

$$A_7 = 1 + 2 \cdot (\cos(\omega \cdot h) + \cos(2\omega \cdot h) + \cos(3\omega \cdot h)).$$

Результаты работы описанного выше алгоритма для трех и пяти выборок измеряемого сигнала приведены на рисунке 3.7 и 3.8 соответственно.

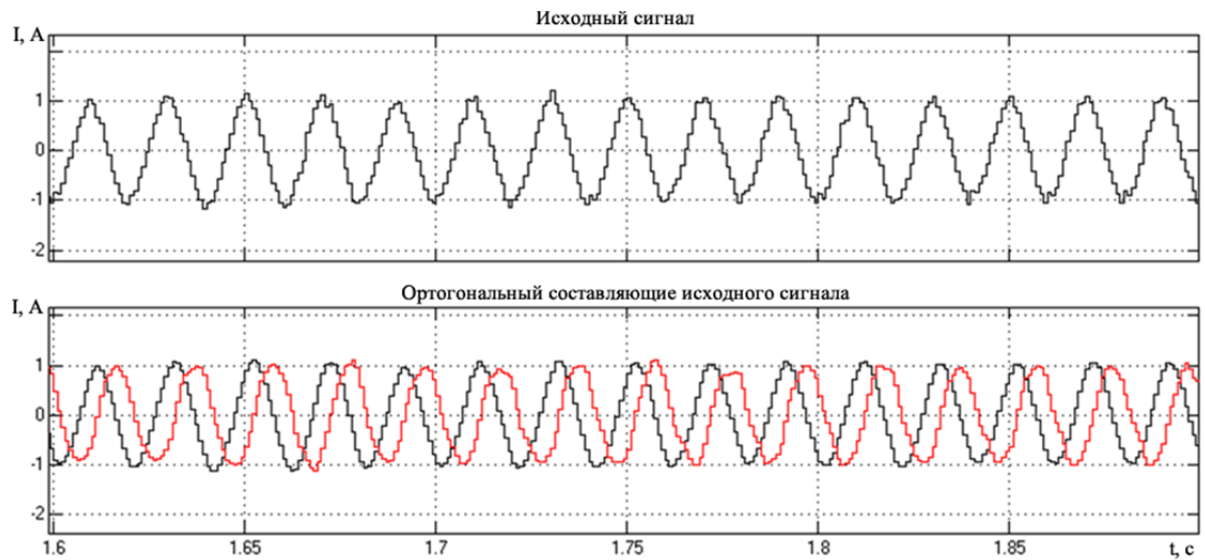


Рисунок 3.7 – Результаты получения ортогональных составляющих по трем выборкам измеряемого сигнала и его производным в процессе компьютерного моделирования

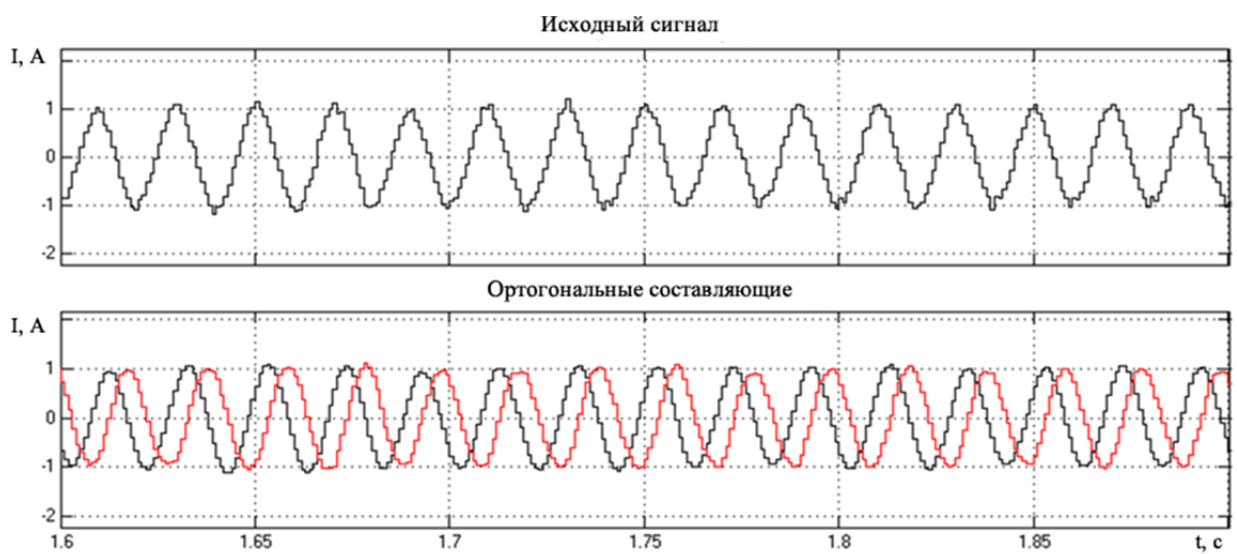


Рисунок 3.8 – Результаты получения ортогональных составляющих по пяти выборкам измеряемого сигнала и его производным в процессе компьютерного моделирования

На рисунке 3.9 показаны результаты применения приведенного алгоритма при исследовании измеряемого сигнала, содержащего высшие гармоники (полигармонический сигнал).



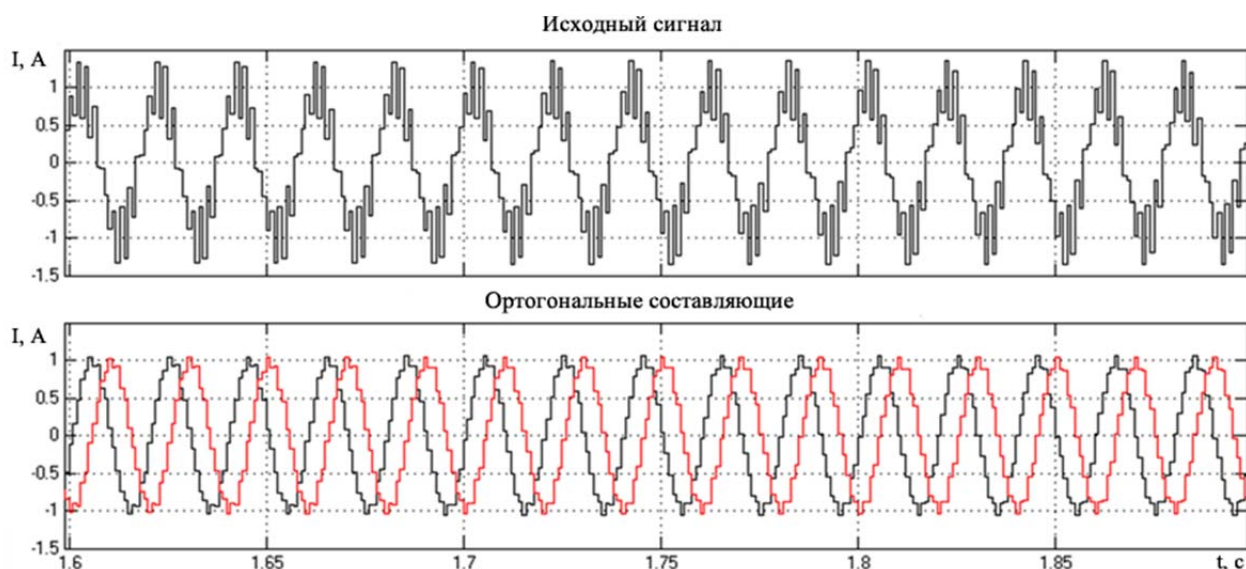


Рисунок 3.9 – Результаты применения алгоритма по пяти выборкам измеряемого сигнала при наличии в нем высших гармоник в процессе компьютерного моделирования

Исследования работы всех приведенных алгоритмов показали, что для быстродействующих защит и для устройств БАПР наибольшими преимуществами обладает алгоритм, основанный на определении производной измеряемого сигнала на основе усреднённых значений по пяти выборкам (Рисунок 3.8 и 3.9). Применение этого алгоритма обеспечивает более быстрое затухание апериодических составляющих в измеряемом сигнале в переходных режимах и устраняет их влияние на искажение синусоиды измеряемого сигнала, а также позволяет выполнить фильтрацию измеряемого сигнала от высших гармоник и случайных помех.

Применение интегрального усреднения мгновенных значений на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты позволяет в течении 5 мс получить ортогональные составляющие измеряемого сигнала вместо 20 мс при использовании интеграла Фурье. По указанной причине разработанный алгоритм подходит наилучшим образом для использования в микропроцессорных устройствах быстродействующего автоматического включения резерва.

### 3.3.2 Разработка математической модели пороговых органов систем измерения тока и напряжения

Для построения пусковых органов тока и напряжения на основе описанных выше векторных составляющих мгновенных значений могут быть сформированы значения амплитуд, найденных по формуле (3.9).

В рассматриваемых трехфазных системах для пусковых органов БАВР можно использовать мгновенные значения результирующих (обобщенных) векторов тока и напряжения, которые, например, для токов определяются как:

$$I(t) = \frac{2}{3} \left[ i_a(t) + e^{j120^\circ} \cdot i_b(t) + e^{j240^\circ} \cdot i_c(t) \right],$$

где:

$$e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Модуль и фаза результирующего вектора в этом случае находится как:

$$|I(t)| = \sqrt{\frac{2}{3} (i_a(t)^2 + i_b(t)^2 + i_c(t)^2)},$$

$$\gamma(t) = \arccos \left[ \cos \left( \frac{i_a(t)}{|I(t)|} \right) \right].$$

В алгоритмах работы устройств БАВР также могут быть использованы значения токов и напряжений прямой или обратной последовательностей в качестве пусковых органов или в логической части БАВР. Определить мгновенные значения вещественных и мнимых составляющих токов (напряжений) прямой и обратной последовательностей можно по формулам:

$$\text{Re}(\underline{I1}) = \frac{1}{2} \left( \frac{i_a'(t)}{\omega} + \frac{i_b(t) - i_c(t)}{\sqrt{3}} \right),$$

$$\text{Re}(\underline{I2}) = \frac{1}{2} \left( \frac{i_a'(t)}{\omega} - \frac{i_b(t) - i_c(t)}{\sqrt{3}} \right),$$

$$\text{Im}(\underline{I1}) = \frac{1}{2} \left( i_a(t) - \frac{i_b^i(t) - i_c^i(t)}{\sqrt{3} \cdot \omega} \right),$$

$$\text{Im}(\underline{I2}) = \frac{1}{2} \left( i_a(t) + \frac{i_b^i(t) - i_c^i(t)}{\sqrt{3} \cdot \omega} \right).$$

Так, например, на рисунке 3.10 приведены реальные осциллограммы пуска конденсатного электронасоса (КЭН) собственных нужд электростанции с блоками мощностью 200 МВт, и приведены результаты работы алгоритма определения прямой последовательности токов и напряжений приведённого в данной работе.

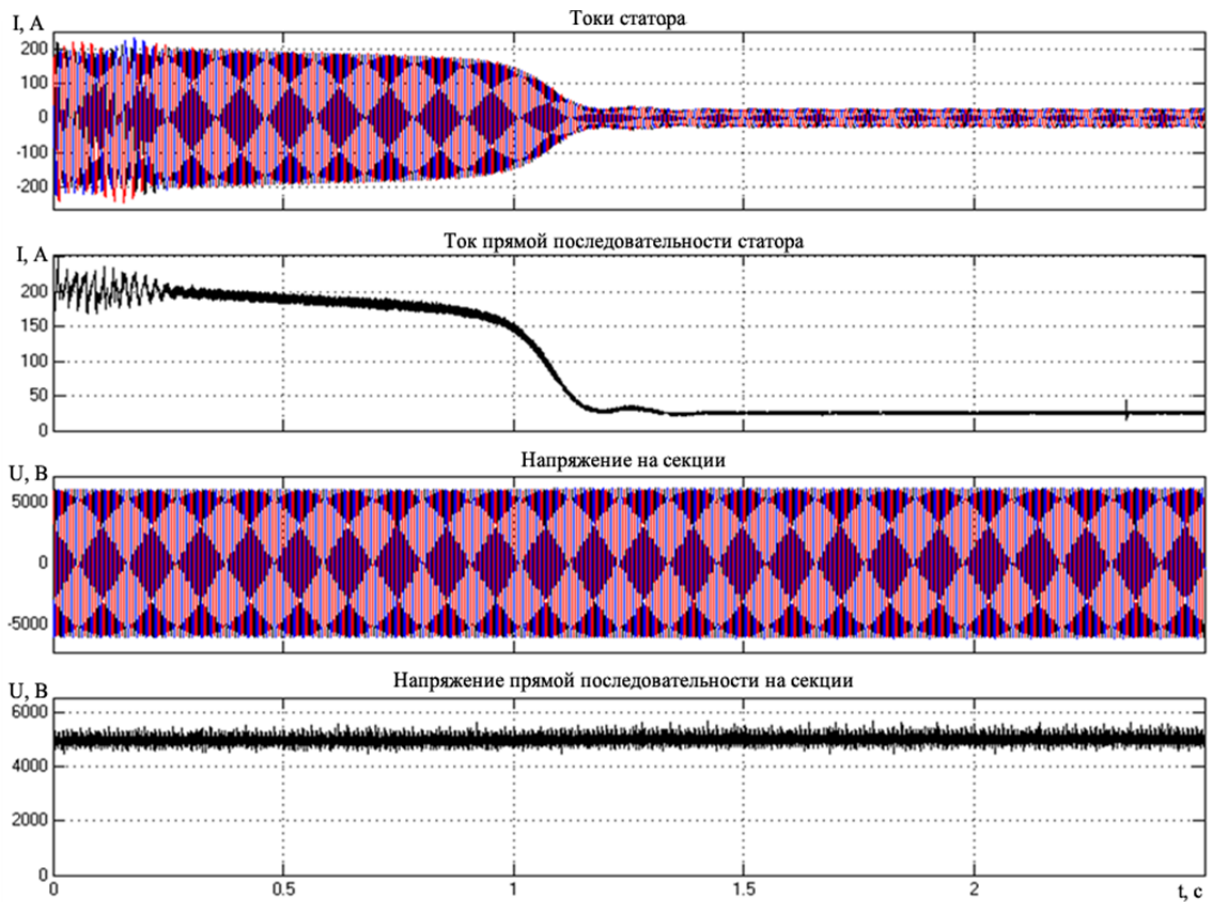


Рисунок 3.10 – Осциллограмма токов и напряжений на выводах двигателя АВ 113-4 мощностью 250 кВт в режиме пуска КЭН (результат компьютерного моделирования)

### 3.3.3 Разработка математической модели органа контроля направления мощности

По найденным с помощью (3.11) векторам токов и напряжений для каждой из фаз можно определить мощность полную, активную и реактивную:

$$\underline{S}(t) = \underline{U}(t) \cdot \underline{I}(t)^* = \left( \frac{u'(t)}{\omega} + j \cdot u(t) \right) \cdot \left( \frac{i'(t)}{\omega} - j \cdot i(t) \right) = P(t) + j \cdot Q(t), \quad (3.15)$$

$$P(t) = \frac{u'(t) \cdot i'(t)}{\omega^2} + u(t) \cdot i(t), \quad (3.16)$$

$$Q(t) = u(t) \cdot \frac{i'(t)}{\omega} - \frac{u'(t)}{\omega} \cdot i(t). \quad (3.17)$$

На рисунке 3.11 и рисунке 3.12 приведены результаты определения активной и реактивной мощностей в фазе А на вводе секции по формулам (3.16) и (3.17) соответственно в режиме трехфазного короткого замыкания во внешней сети электроснабжения.

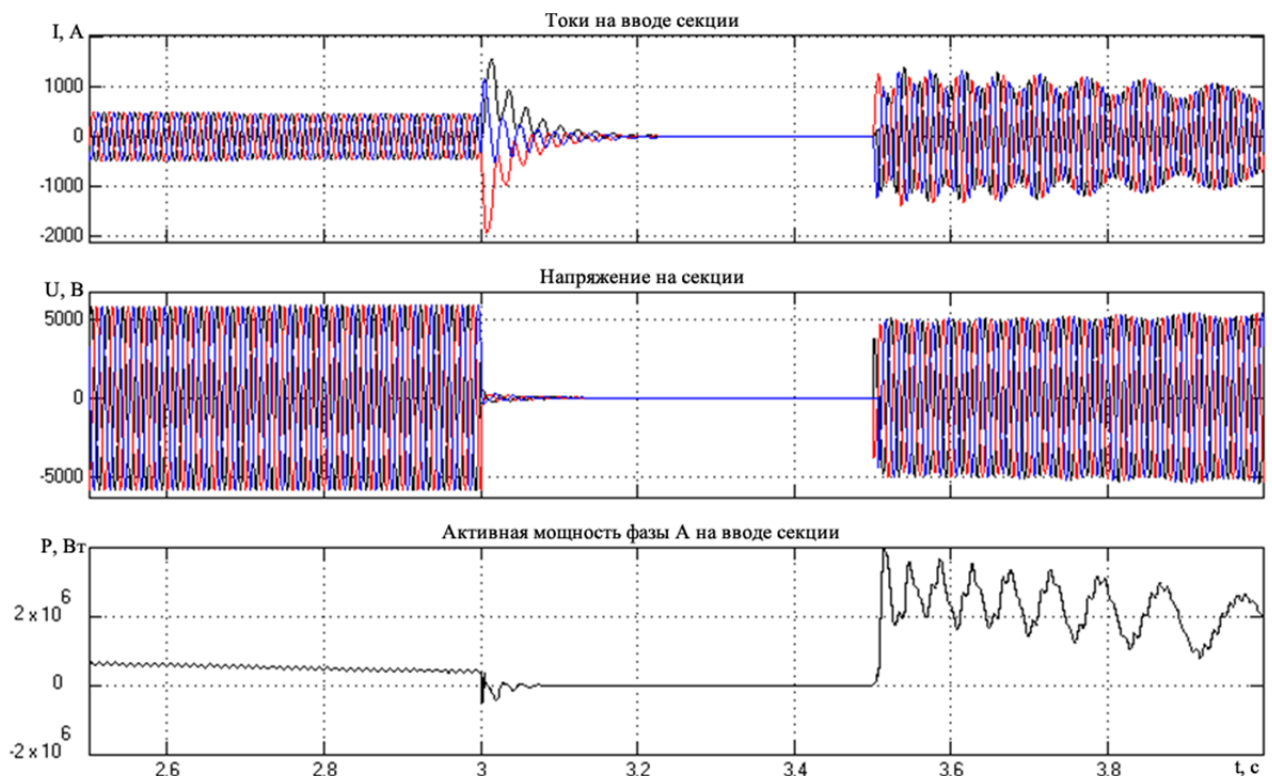


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования параметров, используемых для определения активной мощности фазы А на вводе секции

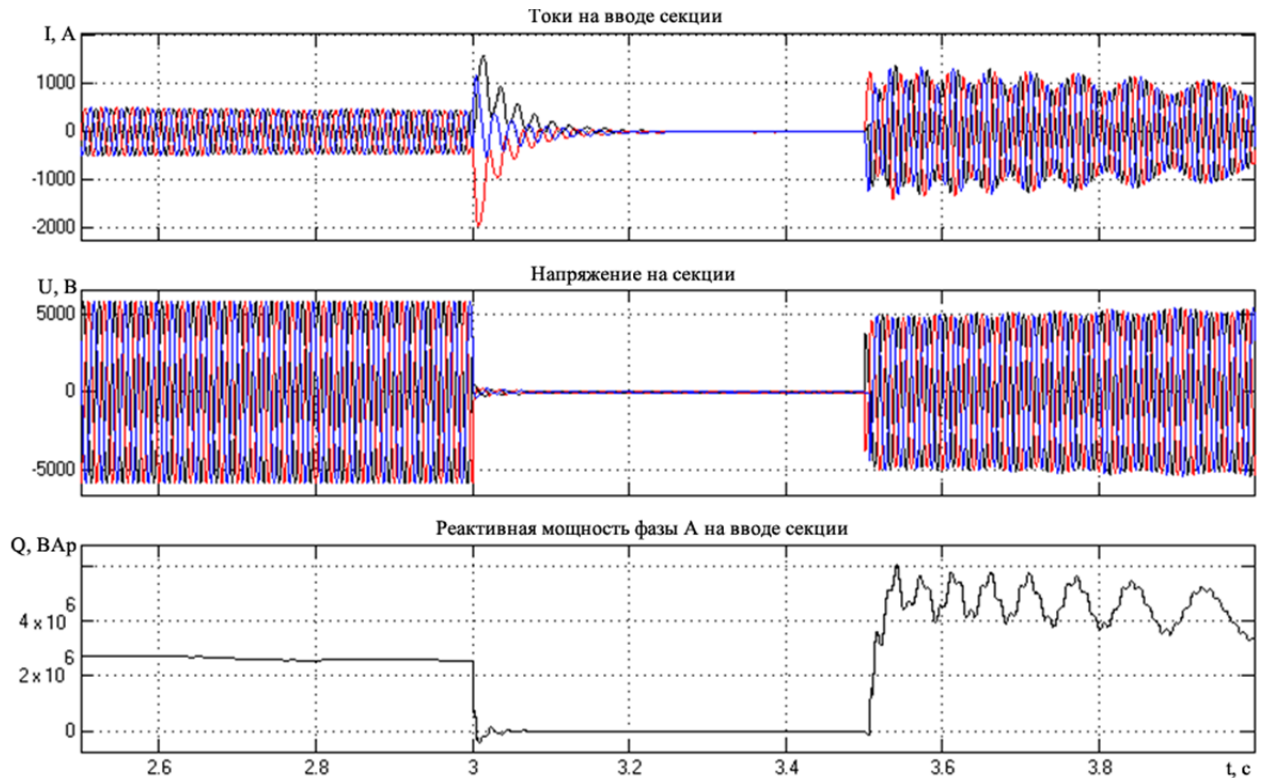


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования параметров, используемых для определения реактивной мощности фазы А на вводе секции

Из рисунка 3.11 и рисунка 3.12 видно, что при возникновении внешнего короткого замыкания направление мощности на вводе секции меняется, т.е. двигатели начинают подпитывать место короткого замыкания, вращаясь с остаточной скоростью.

На основе (3.15) – (3.17) можно сформировать реле направления мощности косинусного, синусного или смешанного типа, используя известные схемы (30, 60, 90-градусные). Например, направление мощности, определяемое по знаку синуса или косинуса угла между током и напряжением можно найти по выражениям:

$$\sin(\varphi(t)) = \frac{Q(t)}{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}},$$

$$\cos(\varphi(t)) = \frac{P(t)}{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}}.$$

Принцип реализации реле направления мощности смешанного типа подробно описан в [100]. Для его пофазной реализации используется выражение,

в котором с помощью угла  $\alpha$  выбирается угол максимальной чувствительности и требуемая зона работы реле:

$$P_{a1} = (u_{xa1} \cdot i_{xa1} + u_{ya1} \cdot i_{ya1}) \cdot \cos(\alpha) + (u_{ya1} \cdot i_{xa1} - u_{xa1} \cdot i_{ya1}) \cdot \sin(\alpha).$$

На рисунке 3.13 показаны результаты работы реле направления мощности смешанного типа с углом максимальной чувствительности равным  $60^\circ$  при трехфазном коротком замыкании во внешней сети электроснабжения. В качестве признака для срабатывания пускового органа было принято условие перехода направления мощности через ноль в отрицательную плоскость.

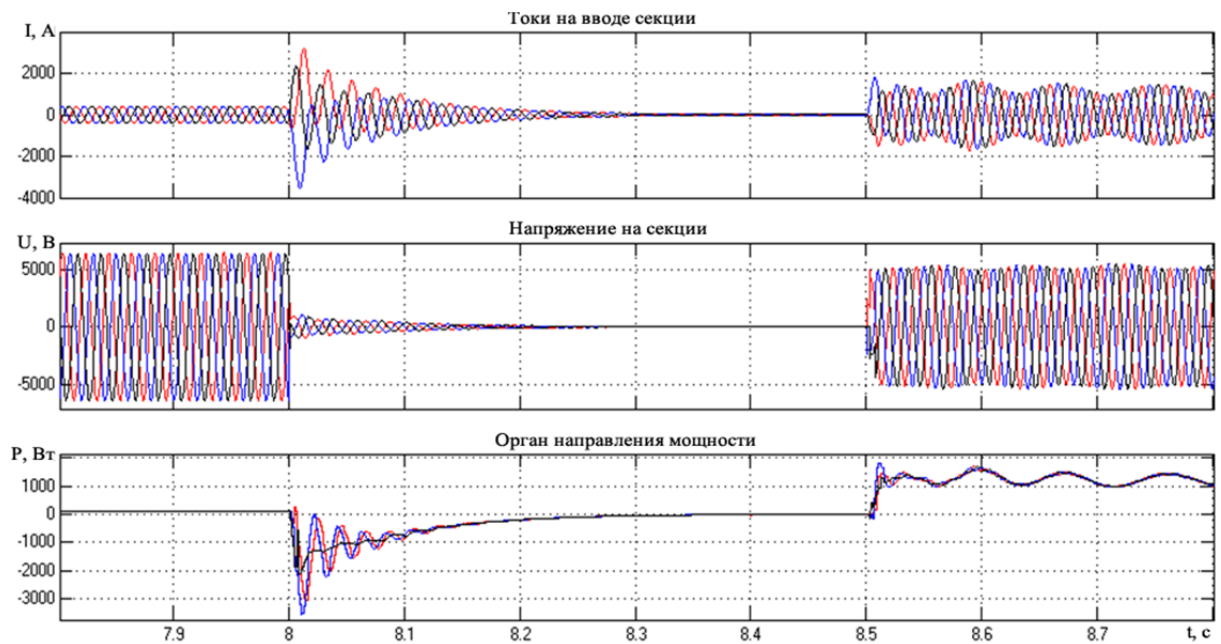


Рисунок 3.13 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем коротком замыкании

Из рисунка 3.13 видно, что использование реле направления мощности смешанного типа гораздо эффективнее, чем значения активной или реактивной мощности на вводе секции (Рисунок 3.11 и Рисунок 3.12), так как изменение знака мощности на вводе является более явным и длительным по времени.

На рисунке 3.14 показано время реакции пускового органа направления мощности на появление аварийного режима при трехфазном коротком замыкании во внешней сети электроснабжения, которое составило 0.001 секунды.



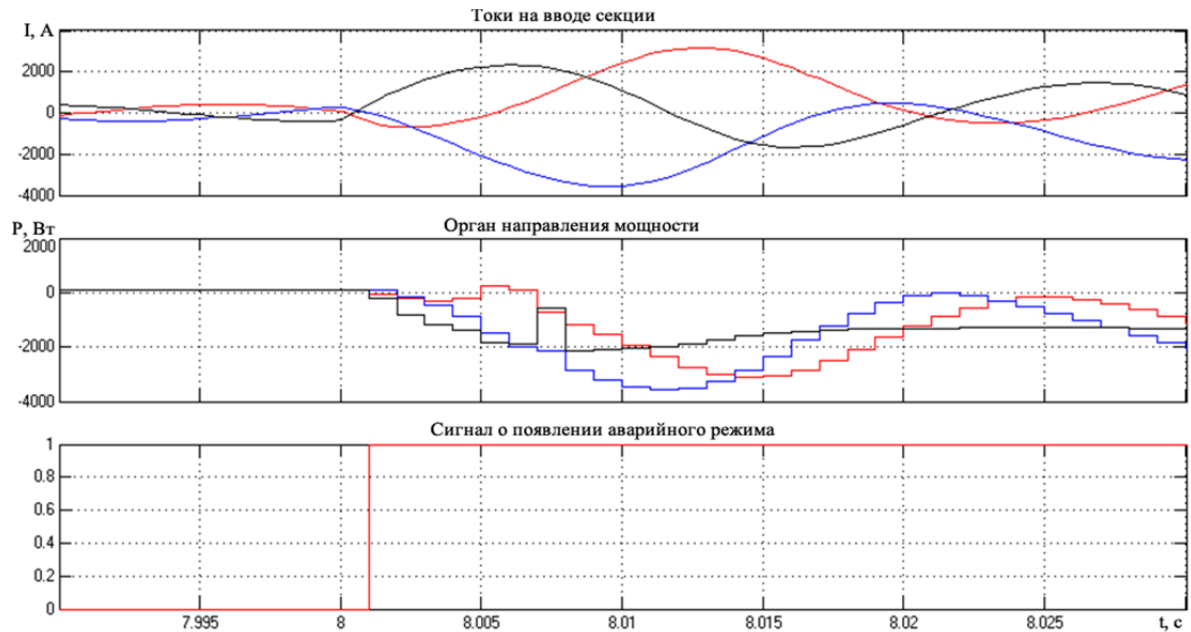


Рисунок 3.14 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем трехфазном коротком замыкании

Однако при таком подходе к формированию пускового органа направления мощности пусковой орган может срабатывать ложно в режимах пуска двигательной нагрузки, что показано на рисунке 3.15.

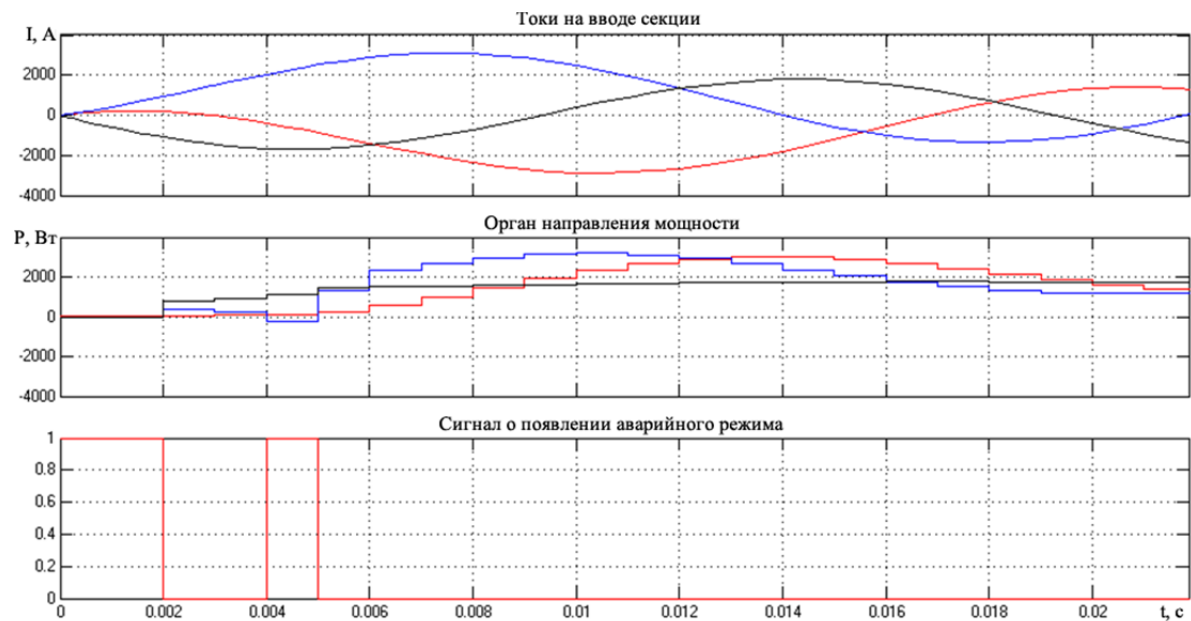


Рисунок 3.15 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа в режиме пуска

В этом случае для обеспечения правильной работы пускового органа направления мощности и отстройки от пускового режима необходимо изменить условие срабатывание пускового органа, то есть увеличить уставку органа направления мощности в отрицательной плоскости или изменить угол максимальной чувствительности. В этом случае время реакции пускового органа на появление аварийного режима увеличивается с 0.001 секунды до 0.002 секунды (Рисунок 3.16), что приводит к увеличению суммарного времени переключения на резервный источник питания. Еще одним недостатком такого подхода является возможность ложного срабатывания при коротком замыкании на секции или близком коротком замыкании на отходящем присоединении, так как при таких коротких замыканиях напряжение на секции 6 кВ снижается почти до 0 и в этом случае работа органа направления мощности может быть ложной, как показано на рисунке 3.17.

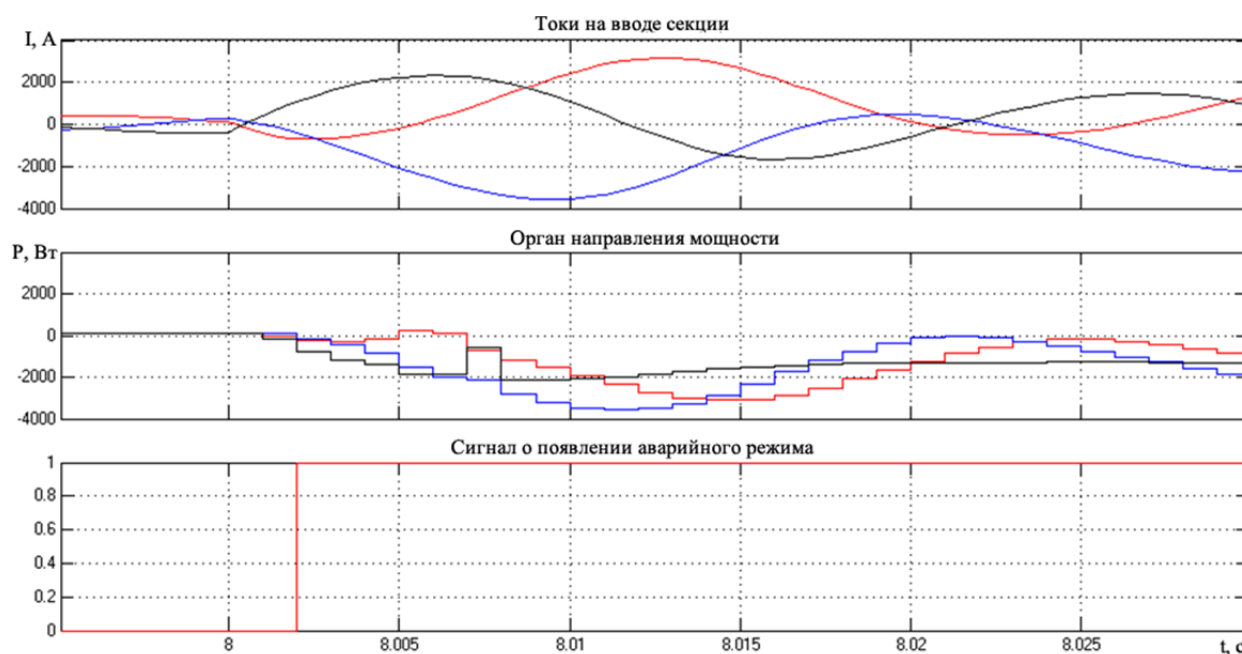


Рисунок 3.16 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем трехфазном коротком замыкании



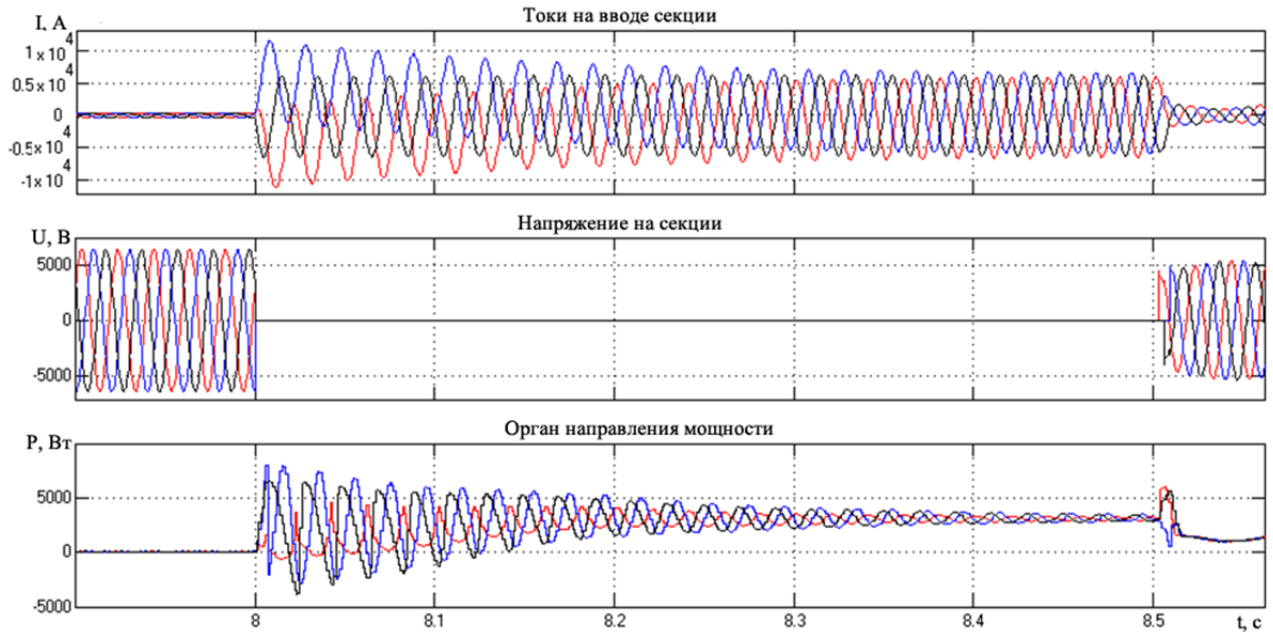


Рисунок 3.17 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при коротком замыкании на секции 6 кВ

С целью повышения надежности работы и исключения ложного срабатывания пускового органа направления мощности при коротких замыканиях на секции и отходящих присоединениях для повышения уровня остаточного напряжения на секции в данной работе предлагается в качестве напряжения, используемого для определения направления мощности использовать напряжение, которое формируется на основе остаточного напряжения на секции с учетом падения напряжения в трансформаторе по формуле:

$$U = U_{ост} + \Delta U, \quad (3.18)$$

где:  $U_{ост}$  – остаточное напряжение на секции 6 кВ;

$\Delta U$  – падение напряжения на трансформаторе.

Падение напряжения на трансформаторе рассчитывается по формуле:

$$\Delta U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt},$$

где:  $R$  – активное сопротивление трансформатора;

$L$  – индуктивность трансформатора.

Работа реле направления мощности при использовании напряжения, определенного по выражению (3.18) при трехфазном коротком замыкании на секции 6 кВ показана на рисунке 3.18. Угол максимальной чувствительности для моделирования работы органа направления мощности был принят  $90^\circ$ .

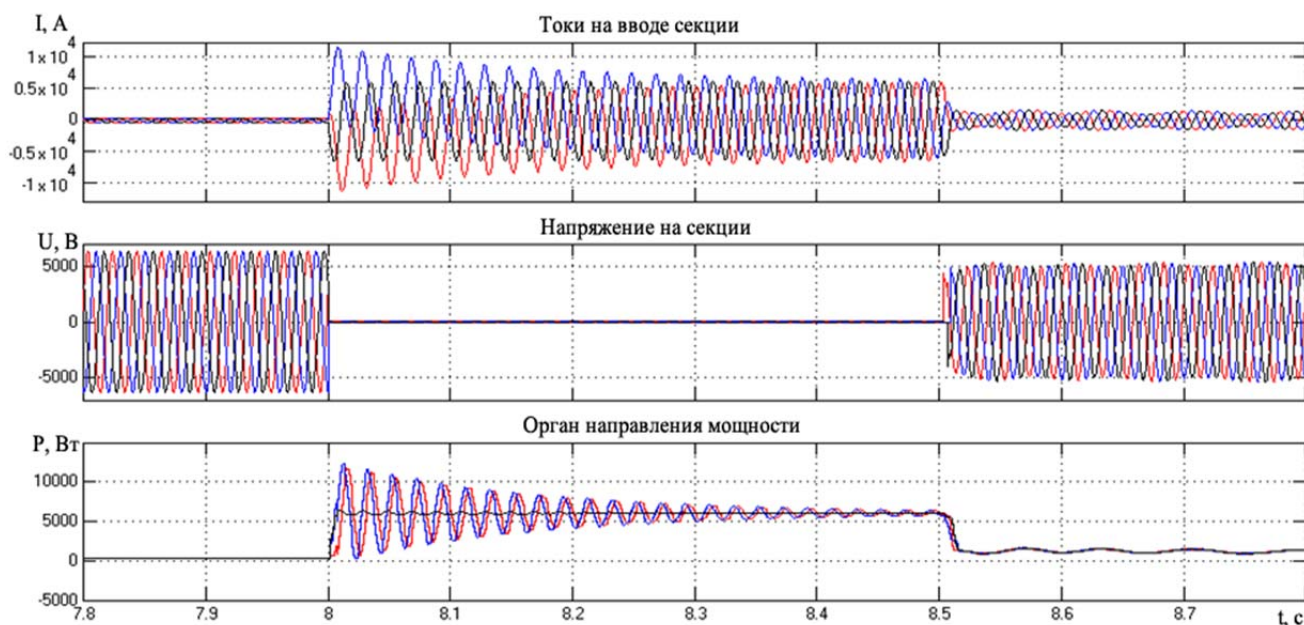


Рисунок 3.18 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при коротком замыкании на секции 6 кВ

Из рисунка 3.18 видно, что направление мощности на вводе секции не меняет своего знака, а, следовательно, и орган направления мощности срабатывать в таком режиме не будет, что обеспечит надежную работу пускового органа при коротких замыканиях, как на секции, так и на отходящих присоединениях.

На рисунке 3.19 показаны результаты моделирования работы, описанного органа направления мощности при трехфазном коротком замыкании в сети внешнего электроснабжения. Время его реакции на появление аварийного режима составило 0.002 секунды.

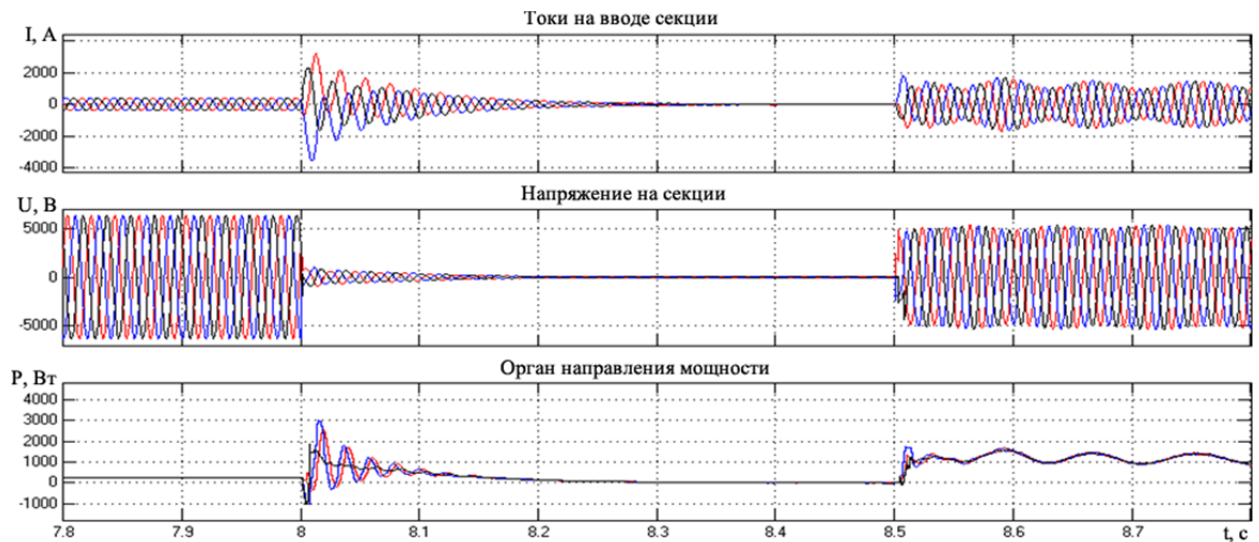


Рисунок 3.19 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем коротком замыкании

Тем не менее, недостатком приведенного подхода также является ложное срабатывание в режиме пуска электродвигателей (Рисунок 3.20) и для обеспечения селективной работы также требуется изменение уставки по направлению мощности, но время реакции на появление аварийного режима остается прежним 0.002 секунды (Рисунок 3.21).

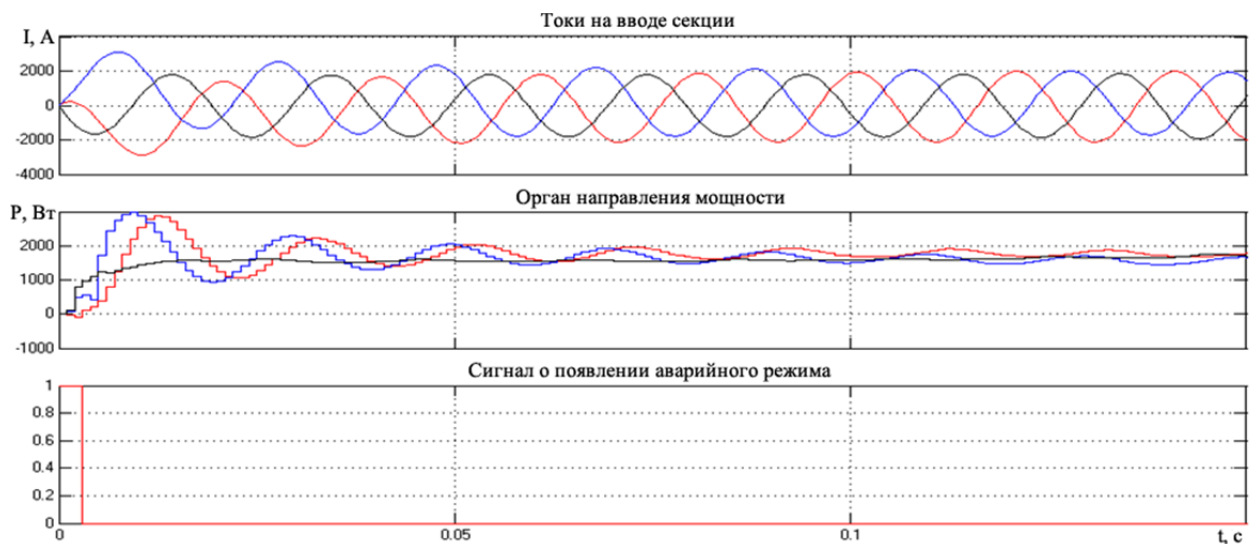


Рисунок 3.20 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при пуске электродвигателей

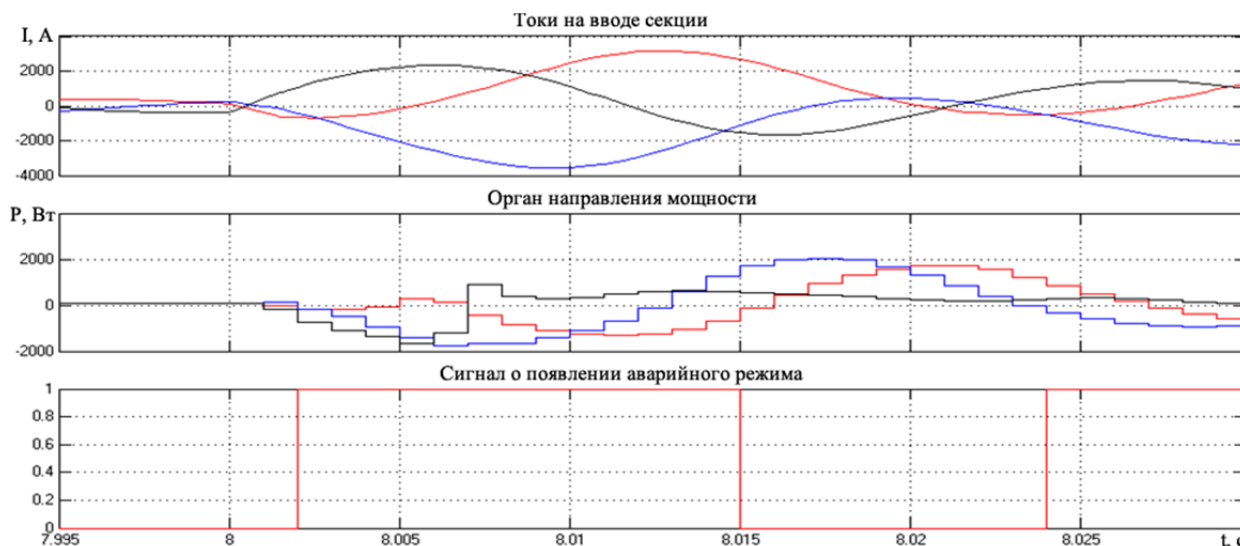


Рисунок 3.21 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем трехфазном коротком замыкании

Для повышения надежности и селективности работы органа направления мощности предлагается выполнить определение направления мощности прямой последовательности на вводе секции на основе тока и напряжения прямой последовательности. Поскольку при близких коротких замыканиях, как во внешней сети электроснабжения, так и на отходящих присоединениях уровень напряжения на секции снижается практически до 0, то для правильного определения направления мощности предлагается использовать мгновенные значения напряжения прямой последовательности предшествующего периода напряжения, хранящиеся в памяти. Такой подход позволяет отказаться от построения сложных алгоритмов, которые для правильной работы реле направления мощности используют долю напряжения резервного источника питания и повысить надежность работы органа направления мощности прямой последовательности. На рисунке 3.22 показаны результаты моделирования работы описанного органа направления мощности при внешнем трехфазном коротком замыкании с установленным углом максимальной чувствительности  $60^\circ$ .

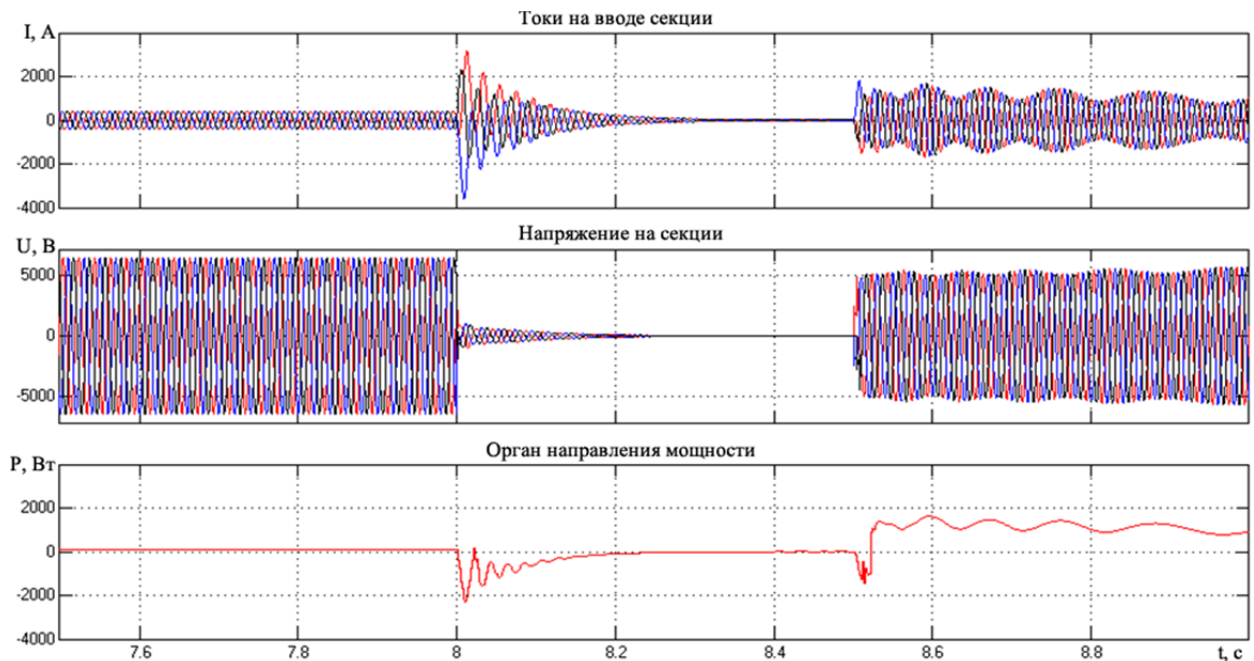


Рисунок 3.22 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности прямой последовательности при внешнем коротком замыкании

Из рисунка 3.22 видна однозначная работа органа направления мощности, которая позволяет сформировать импульс на отключение выключателя достаточно большой продолжительности и не требует построения дополнительных алгоритмов, обеспечивающих расширение импульса.

На рисунке 3.23 показана работа органа направления мощности при трехфазном коротком замыкании на секции.

Как видно из рисунка 3.23 направление мощности прямой последовательности на вводе секции не меняет своего направления и орган направления мощности не срабатывает. Такой подход обеспечивает селективную работу органа направления мощности, так как направление мощности не меняется и при коротких замыканиях на отходящих присоединениях (Рисунок 3.24) и в режимах пуска двигательной нагрузки (Рисунок 3.25).



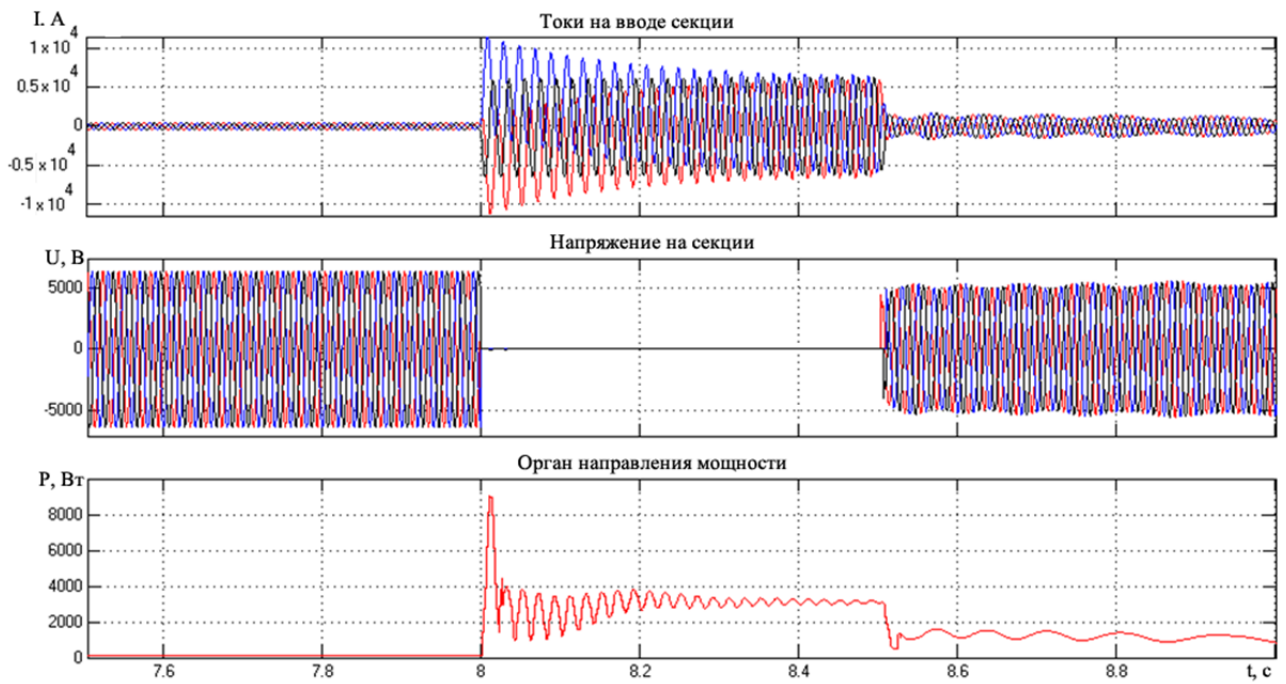


Рисунок 3.23 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при коротком замыкании на секции 6 кВ.

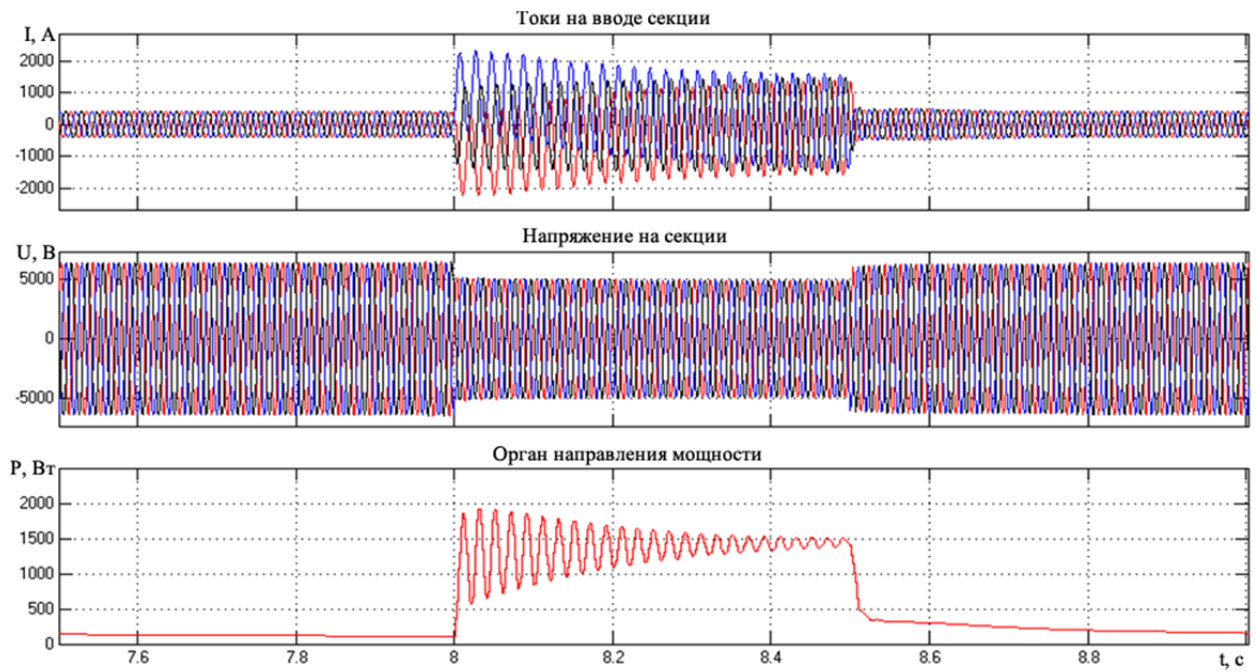


Рисунок 3.24 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности при коротком замыкании на отходящем присоединении 6 кВ.

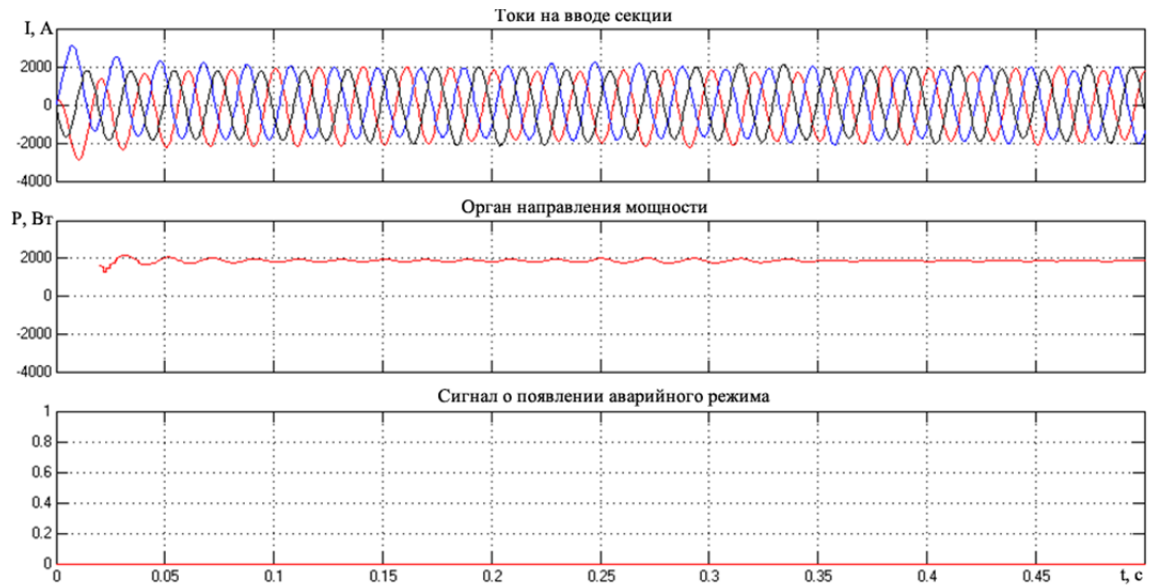


Рисунок 3.25 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности в режиме пуска двигательной нагрузки

Как видно из рисунка 3.26, на котором показано время реакции пускового органа на появления аварийного режима во внешней сети, оно составляет 0.001 секунды, что обеспечивает максимально возможно быстрое выявление аварийного режима в сети внешнего электроснабжения.

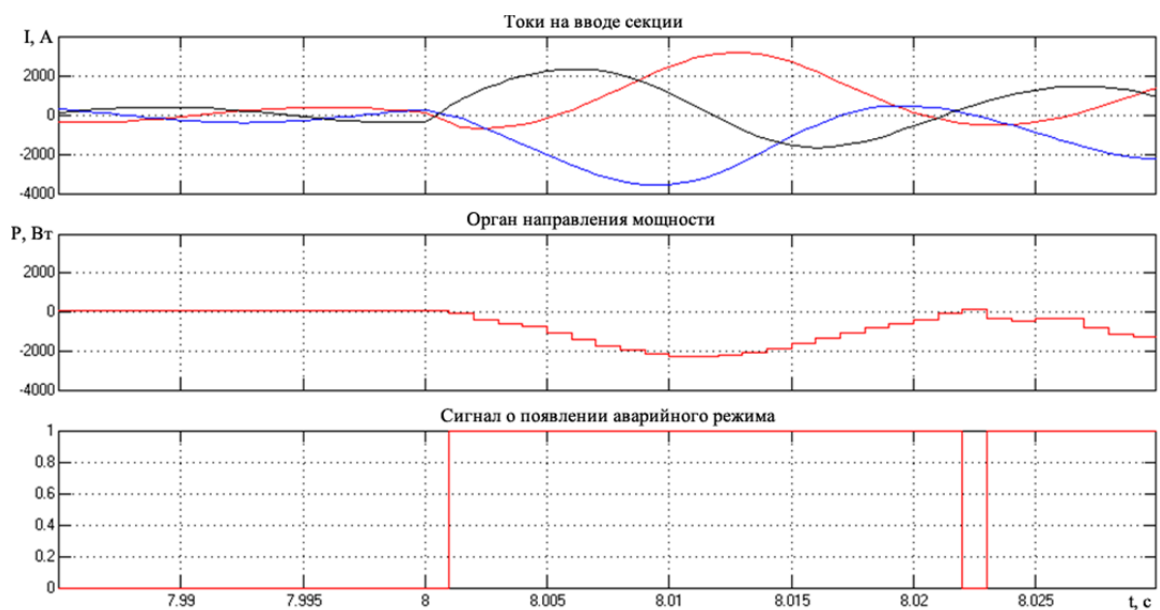


Рисунок 3.26 – Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности смешанного типа при внешнем трехфазном коротком замыкании

Диаграммы параметров объекта исследования, полученные в результате моделирования процессов с учётом работы реле направления мощности, работающего, по рассмотренным алгоритмам показывают, что применение в качестве опорного напряжения для определения направления мощности прямой последовательности напряжения прямой последовательности предшествующего периода измерений позволяет обеспечить селективную работу органа направления мощности при возникновении симметричных и несимметричных коротких замыканий, как в сети внешнего, так и внутреннего электроснабжения.

В таблице 3.1 приведена сравнительная характеристика рассмотренных алгоритмов органа направления мощности:

I – алгоритм пофазного реле направления мощности;

II – алгоритм органа направления мощности с использованием сформированного на основе остаточного напряжения на секции и падения напряжения в трансформаторе;

III – алгоритм органа направления мощности с органом памяти по напряжению.

Таблица 3.1 – Сравнительная характеристика алгоритмов работы БАР

Алгоритм	Вид повреждения	Время реакции, сек	Угол максимальной чувствительности, град	Срабатывание в пусковом режиме
I	Внешнее трехфазное короткое замыкание	0,001	60	+
II		0,002		+
III		0,001		-
I		0,002	90	-
II		0,002		-
III		0,001		-
I	Внешнее двухфазное короткое замыкание	0,001	60	+
II		0,002		+
III		0,001		-
I		0,002	90	+
II		0,002		+
III		0,002		-
I	Внешнее однофазное короткое замыкание	0,004	60	+
II		0,005		+
III		0,004		-
I		0,003	90	+
II		0,003		+
III		0,004		-



Из данных таблицы 3.1 видно, что III алгоритм пускового органа устройства БАВР является более эффективным, так как не срабатывает в режимах пуска электродвигателей, независимо от угла максимальной чувствительности, и при значении угла максимальной чувствительности  $60^0$  является наиболее быстродействующим, что позволяет сократить время переключения на резервный источник питания. В отличие от известных аналогов [35, 36], усовершенствованный пусковой орган направления мощности не требует использования доли напряжения резервной секции для определения направления мощности, которое может изменяться с частотой, отличной от частоты напряжения основного источника питания и может привести к ложному срабатыванию.

#### 3.3.4 Разработка математической модели органа измерения угла между напряжениями и модели синхронизатора

Для оперативного определения потери питания и реализации быстрого и синфазного переключения на резервный источник питания в схему работы устройства БАВР должен быть введен блок определения угла или косинуса угла между векторами напряжений основной и резервной секций.

В предлагаемом способе предусматривается измерение мгновенных значений фазных напряжений взаиморезервируемых секций ( $u_{1A}$ ,  $u_{1B}$ ,  $u_{1C}$  и  $u_{2A}$ ,  $u_{2B}$ ,  $u_{2C}$ ), с помощью которых определяется косинус  $\cos(\varphi)$  угла  $\varphi$  между обобщенными векторами напряжений этих секций. Для этого сначала определяются модули мгновенных значений обобщенных векторов напряжений на основной ( $U1$ ) и резервной ( $U2$ ) секциях и модуль вектора разности этих напряжений ( $\Delta U$ ) по формулам:

$$U1 = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1C}^2)}; \quad U2 = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (u_{2A}^2 + u_{2B}^2 + u_{2C}^2)}; \quad (3.19)$$

$$\Delta U = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot ((u_{1A} - u_{2A})^2 + (u_{1B} - u_{2B})^2 + (u_{1C} - u_{2C})^2)} \quad (3.20)$$

По теореме косинусов для векторного треугольника, состоящего из напряжений  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\Delta U$ , можно определить косинус  $\cos(\varphi)$  угла  $\varphi$  между обобщенными векторами напряжений секций как:

$$\cos(\varphi) = \frac{U_1^2 + U_2^2 - \Delta U^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2} \quad (3.21)$$

Подставив выражения (3.19), (3.20) в (3.21), после соответствующих преобразований получим выражение для определения мгновенного значения косинуса угла по данным измерений напряжений секций:

$$\cos(\varphi) = \frac{u_{1A} \cdot u_{2A} + u_{1B} \cdot u_{2B} + u_{1C} \cdot u_{2C}}{\sqrt{(u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1C}^2) \cdot (u_{2A}^2 + u_{2B}^2 + u_{2C}^2)}}. \quad (3.22)$$

Как известно из [1, 10] значения угла  $\varphi$  после отключения питания секции ускоренно возрастают во времени по близкой к квадратичной функциональной зависимости. Поэтому временную зависимость угла от времени целесообразно аппроксимировать параболой, уравнение которой имеет вид:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \quad (3.23)$$

Для определения коэффициентов параболы  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  фиксируются с помощью счетчика времени моменты времени  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  при которых косинус угла рассогласования достигает заданных значений  $\cos(\varphi_0)$ ,  $\cos(\varphi_1)$ ,  $\cos(\varphi_2)$ , соответствующих значениям углов  $\varphi(t_0)$ ,  $\varphi(t_1)$ ,  $\varphi(t_2)$ . За начало отсчета времени принимается момент времени  $T_0$  и тогда  $t_0=0$ ,  $t_1=T_1-T_0$ ,  $t_2=T_2-T_0$ . Из решения системы трех уравнений

$$\begin{aligned} \varphi(t_0) &= a_0 + a_1 \cdot t_0 + a_2 \cdot t_0^2 \\ \varphi(t_1) &= a_0 + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_1^2 \\ \varphi(t_2) &= a_0 + a_1 \cdot t_2 + a_2 \cdot t_2^2 \end{aligned} \quad (3.24)$$

коэффициенты параболы  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  могут быть определены по формулам:

$$a_2 = \frac{1}{t_2^2 - t_1 \cdot t_2} \cdot \left[ \varphi(t_2) - \varphi(t_0) - \frac{t_2}{t_1} (\varphi(t_1) - \varphi(t_0)) \right], \quad (3.25)$$

$$a_0 = \varphi(t_0), \quad a_1 = \frac{1}{t_1} \cdot (\varphi(t_1) - a_0 - a_2 \cdot t_1^2), \quad (3.26)$$

Для определения момента времени  $t_3$ , соответствующего достижению углом рассогласования значения  $360^\circ$ , подставим в выражение (3.23)  $\varphi(t_3)=2\pi$  и получим квадратное уравнение:

$$a_2 \cdot t_3^2 + a_1 \cdot t_3 + (a_0 - 2\pi) = 0 \quad (3.27)$$

Из решения уравнения (3.27) время достижения углом рассогласования значения  $360^\circ$  определяется как:

$$t_3 = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4 \cdot a_2 \cdot (a_0 - 2\pi)}}{2 \cdot a_2} \quad (3.28)$$

Таким образом, теперь при известном собственном времени включения выключателя  $t_{\text{выкл}}$  момент времени  $t_X$ , а следовательно и  $T_X$ , для подачи команды на синфазное включение выключателя резервного питания определяется как

$$t_X = t_3 - t_{\text{выкл}}; \quad T_X = T_0 + t_X. \quad (3.29)$$

Результаты моделирования режима потери питания и определения момента совпадения по фазе напряжений основного и резервного источников питания приведены на рисунке 3.27. В качестве контрольных значений косинуса угла были приняты следующие значения:  $\varphi_0 = \cos(\pi/3)$ ,  $\varphi_1 = \cos(\pi/2)$ ,  $\varphi_2 = 0.999\cos(\pi)$ .

Из рисунка 3.27 следует, что потеря питания секции произошла в момент времени 7 секунд и началось изменение величины угла между векторами напряжений основного и резервного источников питания. В результате вычислений по формулам (3.22) – (3.29) было определено время для подачи команды на включение резервного источника питания с учётом времени работы выключателя. В соответствии с рисунком 3.27 время совпадения по фазе остаточного напряжения на секции основного источника питания и напряжением резервного источника питания составило 7.27 секунды с момента исчезновения питания, а время подачи команды на включение быстродействующего секционного выключателя со временем включения 0.022 секунды [101] составило 7.248.

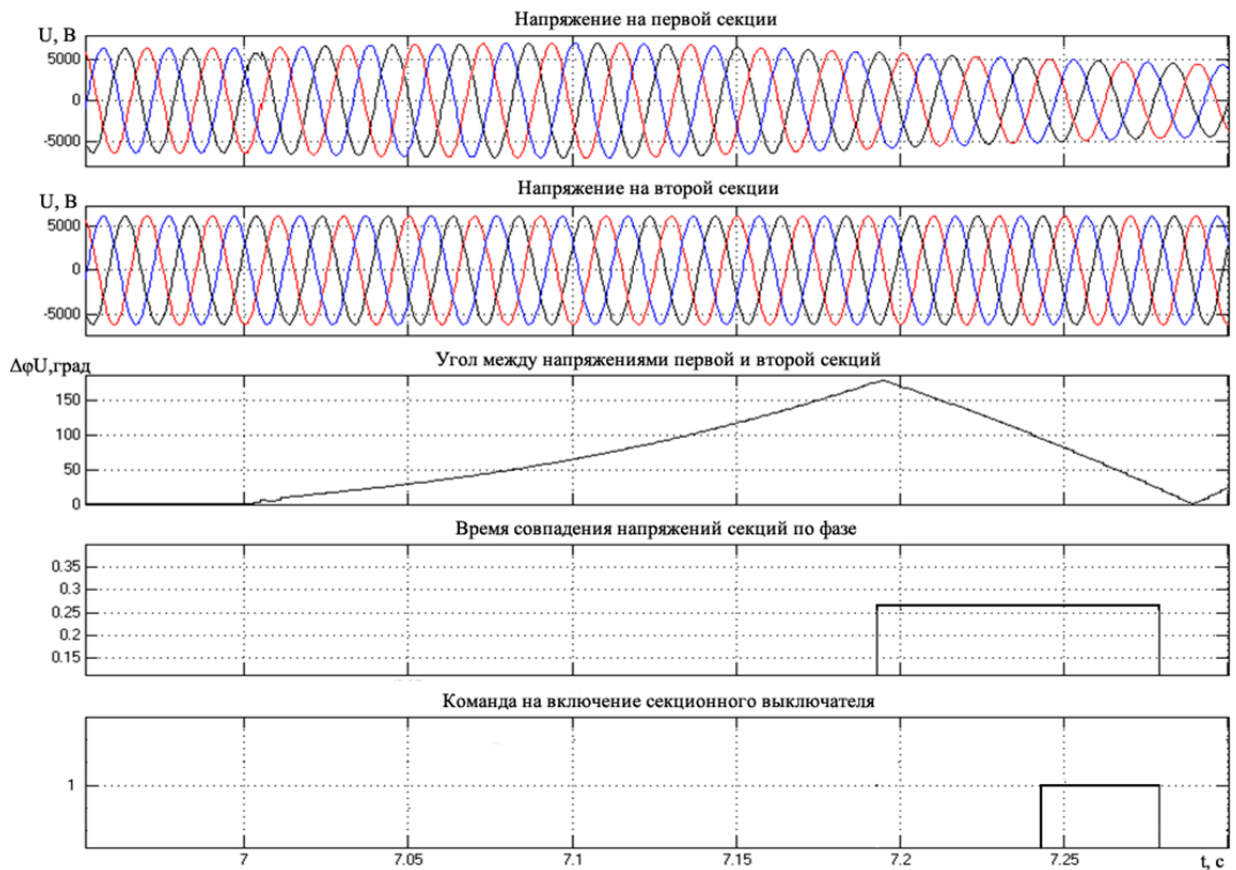


Рисунок 3.27 – Результаты моделирования процесса определения момента совпадения фаз напряжений с учётом времени работы выключателя

Из результатов компьютерного моделирования (Рисунок 3.27) видно, что разработанный алгоритм определения момента совпадения фаз напряжений основного и резервного источников питания позволяет определить момент времени для подачи сигнала на включение резервного источника питания с учётом времени работы выключателя и обеспечить синфазную подачу резервного питания.

### 3.4 Выводы по разделу 3

1. Разработана математическая модель многомашинного электромеханического комплекса, адаптированная к исследованию процессов при автоматическом включении резерва электроснабжения. Её основу составляют дифференциальные уравнения, записанные в фазных координатах для всех

элементов системы, что в отличие от известных позволяет учитывать пофазную несимметрию параметров.

2. Разработан метод определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов тока (напряжения), в котором для повышения быстродействия, амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды находят путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных.

3. Усовершенствована модель и структура пускового органа направления мощности, в котором определяют угол сдвига фаз между током и опорным напряжением прямой последовательности, при этом в качестве опорного напряжения используют напряжение на питающих шинах в предыдущем цикле измерений, что позволяет обеспечить успешную работу устройства БАПР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

4. Разработан способ синфазной подачи резервного питания, основанный на контроле мгновенных значений напряжений на двигателях и на резервном источнике питания. Его отличие от известных состоит в том, что в темпе реального процесса выполняется определение параметров аналитической зависимости от времени угла сдвига фаз между напряжениями секций путем фиксации времен достижения углом сдвига фаз трех заданных значений для параболической аппроксимации временной зависимости угла, с помощью которой прогнозируется время совпадения по фазе контролируемых напряжений, что позволяет выполнить синфазную подачу резервного напряжения с учётом времени работы выключателя.

## РАЗДЕЛ 4

# РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МНОГОМАШИННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

## 4.1 Исходная схема и параметры схем замещения составляющих математической модели

В качестве исходной схемы для проведения анализа переходных процессов и режимов работы устройств БАВР примем схему двухтрансформаторной подстанции (Рисунок 4.1), которая питает двигательную нагрузку, состоящую из асинхронных и синхронных электродвигателей, подключенных к шинам 6 кВ. В качестве питающих трансформаторов примем трансформаторы ТДН-16000/110 с обмоткой низшего напряжения 6 кВ. Трансформаторы получают питание от двух независимых источников напряжением 110 кВ по воздушным линиям электропередач.

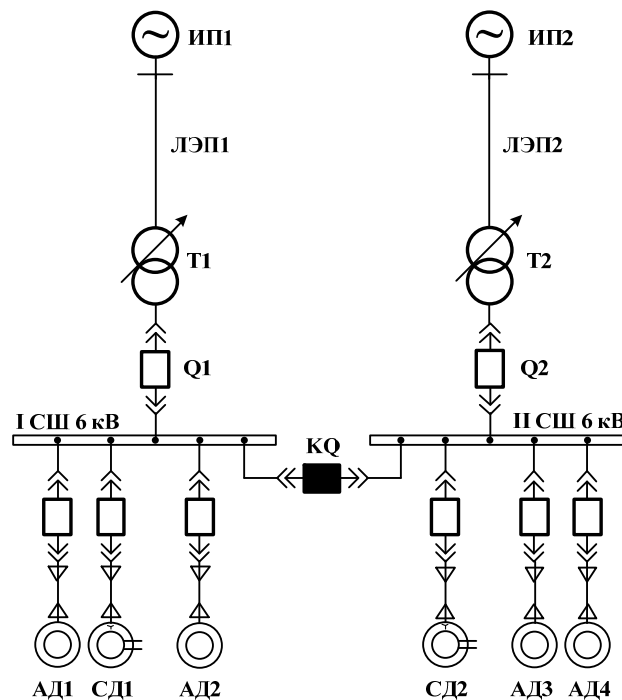


Рисунок 4.1 – Схема двухтрансформаторной подстанции технического комплекса компрессорной подстанции

#### 4.1.1 Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей

Входящие в структуру двухтрансформаторной подстанции (Рисунок 4.1) асинхронные двигатели в процессе моделирования представляются соответствующими схемами замещения (Раздел 3). Параметры схемы замещения рассчитываются на основе каталожных данных, приведенных в таблице 4.1 по методике, приведенной в п. 2.1.

Таблица 4.1 – Каталожные данные асинхронных двигателей 6 кВ

№	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\varphi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{\Pi}$ , о.е.	$M_{\Pi}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.
АД1	ДАМСО 148-8	240	32	740	0,84	0,9	4,6	0,9	2,1
АД2	ВДД 213/54- 16	1700	215	368	0,81	0,94	5,4	1,3	2,5
АД3	ДАЗО 1914- 10/12А	1500	204	597	0,77	0,91	5,5	0,9	2,5
АД4	АВ 113-4	250	29	1480	0,89	0,92	5,8	1,1	2,2

Расчёт параметров эквивалентной схемы замещения для приведенных двигателей приведен в приложении А. В таблице 4.2 показаны результаты расчёта параметров эквивалентных схемы замещения.

Таблица 4.2 – Параметры схемы замещения асинхронных двигателей

№ АД	$R_s$ , о.е.	$X_{\sigma s}$ , о.е.	$X_{\mu}$ , о.е.	$R_{fe}$ , о.е.	$X_{\sigma fe}$ , о.е.	$R_{rl}$ , о.е.	$X_{\sigma rl}$ , о.е.	$R_{r2}$ , о.е.	$X_{\sigma r2}$ , о.е.
АД1	0,044	0,109	2,471	19,825	11,915	0,016	0,166	0,164	0,188
АД2	0,017	0,093	2,140	37,215	20,896	0,028	0,242	0,082	0,128
АД3	0,041	0,091	1,812	24,514	14,644	0,006	0,145	0,108	0,166
АД4	0,034	0,086	3,415	24,765	14,763	0,019	0,274	0,051	0,101

С использованием найденных параметров схем замещения (Таблица 4.1) для каждого из двигателей были рассчитаны значения пускового тока и момента, номинального тока и момента, а также значения максимального момента и КПД, которые полностью совпали с исходными каталожными данными, что показано в

таблице 4.3. Также были рассчитаны значения критических скольжений, которые также показаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение расчётных и каталожных данных асинхронных двигателей АД1 – АД4

Параметр	Каталожные данные, о.е.	Рассчитанные по схеме замещения, о.е.	Каталожные данные, о.е.	Рассчитанные по схеме замещения, о.е.	Каталожные данные, о.е.	Рассчитанные по схеме замещения, о.е.	Каталожные данные, о.е.	Рассчитанные по схеме замещения, о.е.
	АД1		АД2		АД3		АД4	
$I_{\Pi}$	4,6	4,6	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
$M_{\Pi}$	0,9	0,9	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
$M_M$	2,1	2,1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$\eta_H$	0,9	0,9	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
$I_H$	1	1	1	1	1	1	1	1
$M_H$	1	1	1	1	1	1	1	1
$S_K$	–	0.059	–	0,11	–	0,027	–	0,0821

Полученные результаты подтверждают эффективность приведенного метода определения параметров схемы замещения, позволяющего также выполнить анализ статических и динамических характеристик асинхронного двигателя.

Так, например, для асинхронного двигателя ДАМСО 148-8 на рисунке 4.2 приведены зависимости тока статора от скольжения, а на рисунке 4.3 приведены зависимости потребляемой активной мощности и вращающего момента от скольжения. По частотной характеристике проводимостей ротора и роторных контуров, показанной на рисунке 4.4 можно оценить влияние эффекта вытеснения тока в роторе. Каждый из контуров имеет круговую характеристику, а результирующая более сложную форму. На общей характеристике точками указаны значения скольжений.



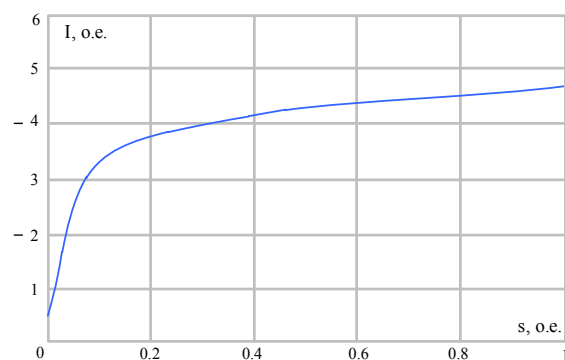


Рисунок 4.2 – Зависимости тока статора от скольжения

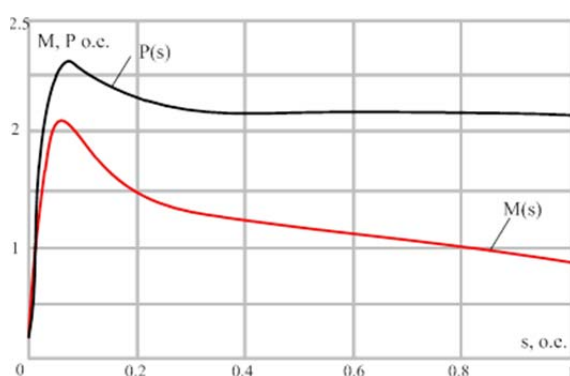


Рисунок 4.3 – Зависимости потребляемой активной мощности и вращающего момента от скольжения

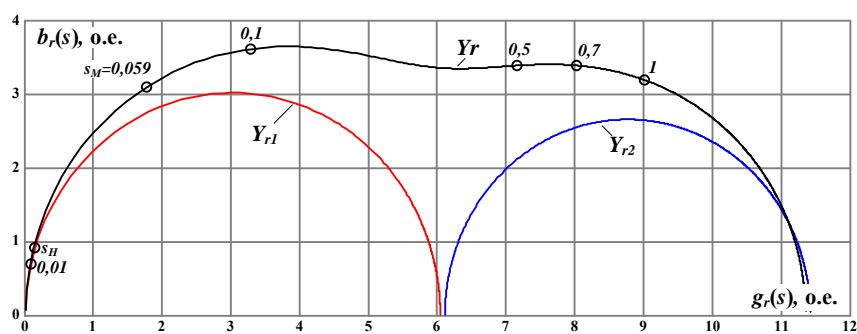


Рисунок 4.4 – Частотные характеристики проводимостей контуров ротора: первого ( $Y_{r1}$ ), второго ( $Y_{r2}$ ) и результирующей ( $Y_r$ )

#### 4.1.2 Определение параметров схем замещения явнополюсных синхронных двигателей

В качестве исходных данных для расчёта параметров схемы замещения примем каталожные данные явнополюсных синхронных двигателей ДСЗ-2209

мощностью 2460 кВт и СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4 мощностью 3150 кВт с напряжением статоров 6 кВ, которые, приведенные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные каталожные данные явнополюсных синхронных двигателей

№	Тип двигателя	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\varphi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{\Pi}$ , о.е.	$M_{\Pi}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.	$I_{fH}$ , А	$U_{fH}$ , В	$T_{f0}$ , о.е.
СД1	ДСЗ-2209	274	100	0,9	0,938	5,2	1,5	1,3	275	192	1,44
СД2	СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4	351	150	0,9	0,959	5,5	1,85	2,32	250	150	1,45

Расчёт параметров схем замещения приведен в приложении А, а в таблице 4.5 приведены результаты расчёта параметров схемы замещения для приведенных синхронных двигателей.

Таблица 4.5 – Параметры эквивалентной схемы замещения в о.е.

№ двигателя	$R_s$ , о.е.	$X_{os}$ , о.е.	$X_{md}$ , о.е.	$X_{mq}$ , о.е.	$R_d$ , о.е.	$X_d$ , о.е.	$R_q$ , о.е.	$X_q$ , о.е.	$R_f$ , о.е.	$X_f$ , о.е.
СД1	0,016	0,096	1,2	0,68	0,052	0,075	0,127	0,127	0,0036	0,229
СД2	0,01	0,091	0,836	0,464	0,109	0,075	0,156	0,097	0,0021	0,127

Совпадение значений токов, моментов и КПД, полученных в результате расчёта на основе параметров схемы замещения, со значениями, приведенными в каталожных данных, показано в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сравнение расчётных и каталожных данных синхронных двигателей СД1 и СД2.

Параметр	Каталожные значения, о.е.	Значения на основе параметров схемы замещения, о.е.	Каталожные значения, о.е.	Значения на основе параметров схемы замещения, о.е.
	СД1		СД2	
$I_{\Pi}$	5,2	5,2	5,5	5,5
$M_{\Pi}$	1,5	1,5	1,85	1,85
$M_M$	1,3	1,3	2,32	2,32
$\eta_H$	0,938	0,93	0,959	0,952
$I_H$	1	1	1	1
$M_H$	1	1	1	1

Рассчитанные по параметрам эквивалентной схемы замещения статические характеристики (зависимости от скольжения токов статора и моментов) для синхронного двигателя ДСЗ-2209 приведены на рисунках 4.5 и 4.6.

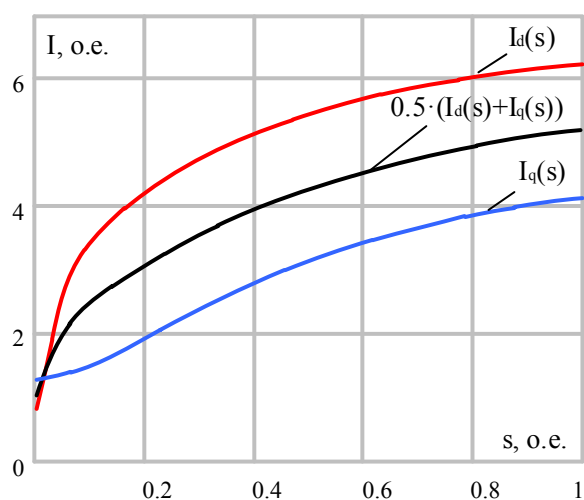


Рисунок 4.5 – Зависимости токов статора синхронного двигателя от скольжения

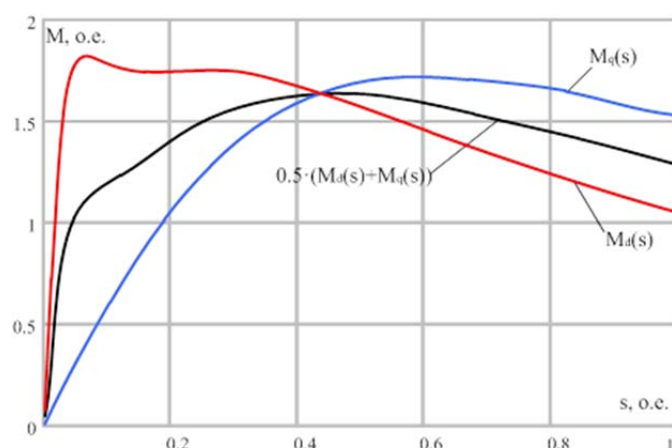


Рисунок 4.6 – Зависимости моментов синхронного двигателя от скольжения

## 4.2 Анализ переходных процессов в аварийных режимах эксплуатации многомашинных электромеханических комплексов

### 4.2.1 Режим потери питания в сети силового присоединения, содержащего двигательную нагрузку

Рассмотрим режим потери питания первой секции (Рисунок 4.1), вызванный отключением питающей линии 110 кВ по причине, не связанной с

короткими замыканиями, вследствие чего напряжение на секции 6 кВ исчезает не сразу, а в первый момент времени возрастает из-за работы форсировки возбуждения синхронного двигателя, после чего начинает затухать по величине и частоте в течение 1 секунды (Рисунок 4.7) и поддерживается за счет запасенной двигателями электромагнитной и кинетической энергии. После потери питания возникает режим группового выбега двигательной нагрузки первой секции, во время, которого одна часть электродвигателей генерирует активную или реактивную мощность, а другая её потребляет, т.е. возникает обмен мощностью между двигателями с различными постоянными времени и коэффициентами загрузки.

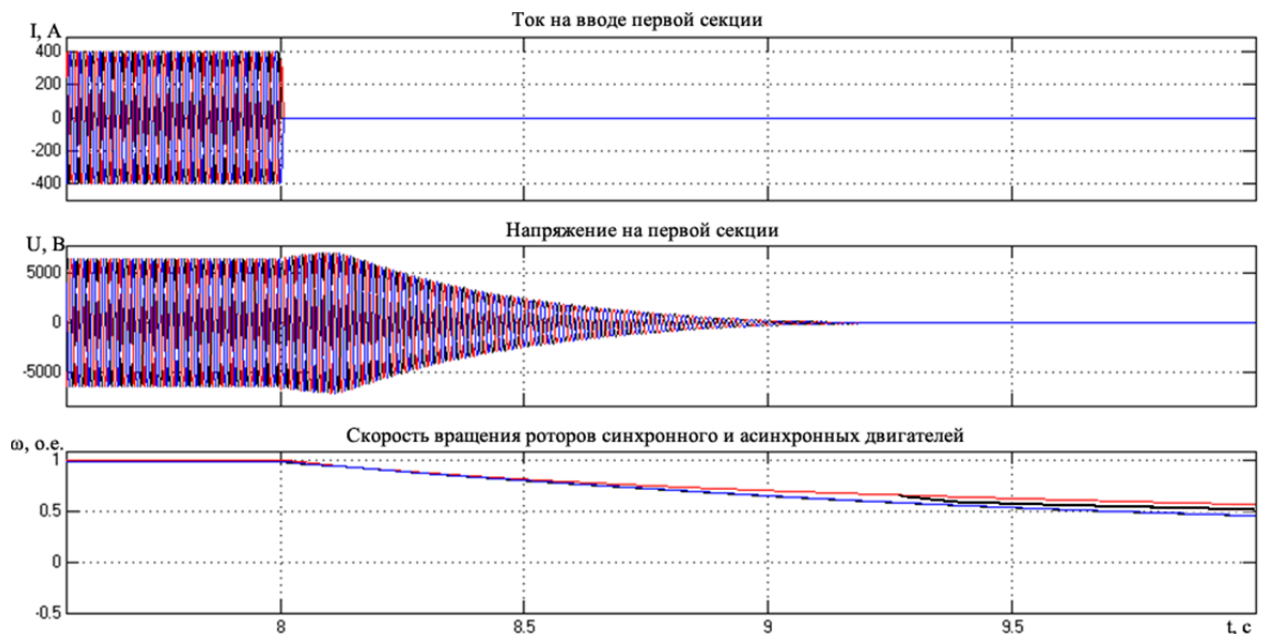


Рисунок 4.7 – Графики изменения частоты и междуфазных напряжений на секции 6 кВ при потере питания асинхронными двигателями ДАМСО 148-8 и ВДД 213/54-16 и синхронным двигателем ДСЗ-2209

В рассматриваемом случае устройство БАВР должно дать команду на отключение вводного выключателя секции и в зависимости от угла сдвига фаз между векторами напряжений основной и резервной секций, а также собственного времени включения секционного выключателя должно выбрать момент подачи команды на его включение.

При противофазном включении резервного питания (Рисунок 4.8) уровень токов самозапуска может достигать 10–15-ти кратного номинального значения, что может негативно сказаться на состоянии двигателей и привести к сокращению их ресурса.

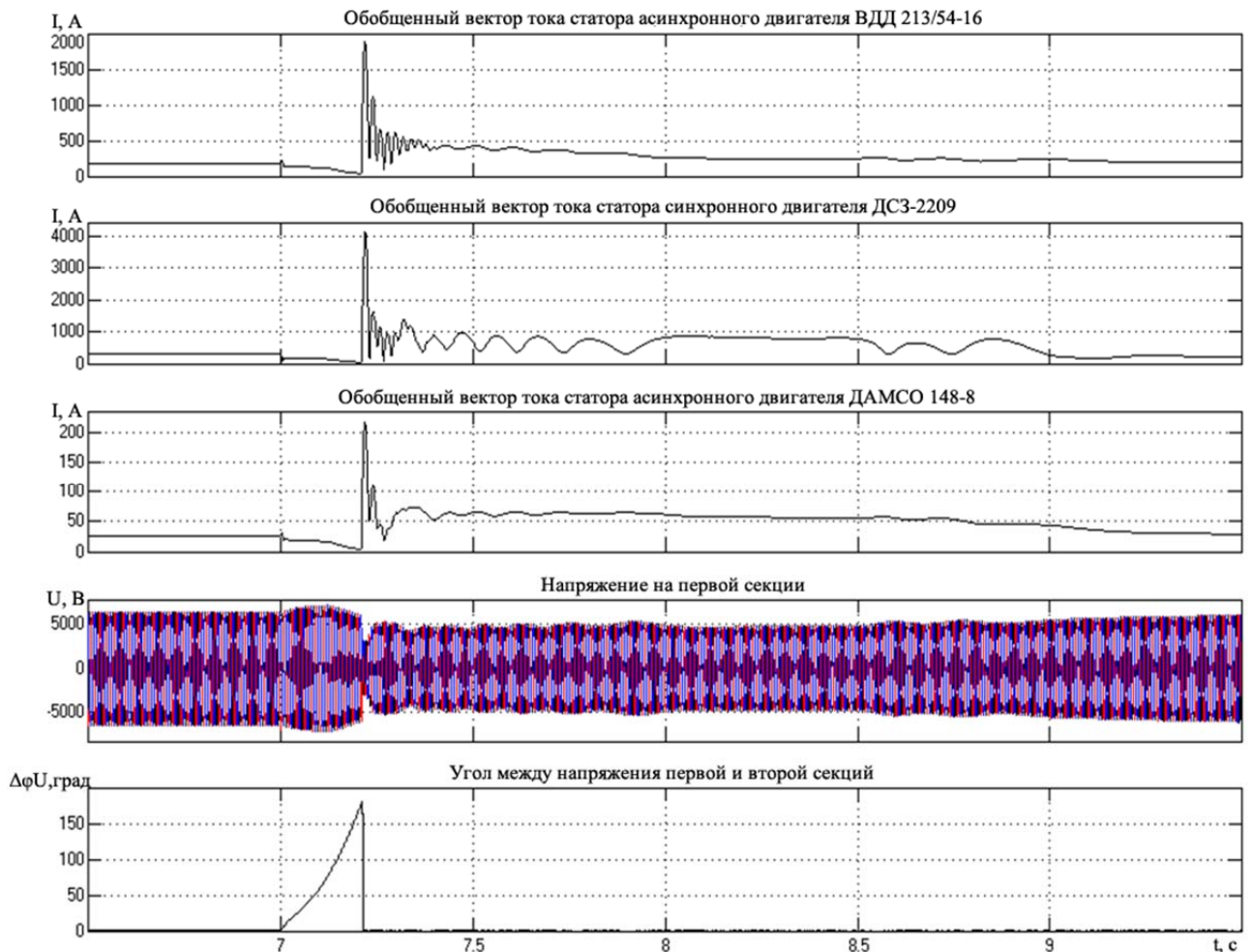


Рисунок 4.8 – Графики изменения токов статоров асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и ДАМСО 148-8 мощностью 240 кВт, синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт при противофазном включении резервного источника питания

Как видно из рисунка 4.8 перерыв питания до момента включения резервного источника питания составил 0.216 секунды, а угол сдвига фаз между напряжениями смежных секций составил  $180^\circ$ . После включения секционного выключателя кратность броска тока самозапуска по отношению к номинальному

току для синхронного двигателя (СД1) составила 12.7 о.е., а для первого (АД1) и второго (АД2) асинхронных двигателей соответственно 10.3 о.е. и 8.5 о.е.

Из приведенных данных следует, что такая подача резервного питания является недопустимой для электродвигателей, несмотря на то, что самозапуск двигательной нагрузки оказался успешным.

Броски тока самозапуска электродвигателей будут наименьшими в случае синфазной подачи резервного питания, то есть непосредственно в момент совпадения фаз остаточного и резервного напряжений (Рисунок 4.9).

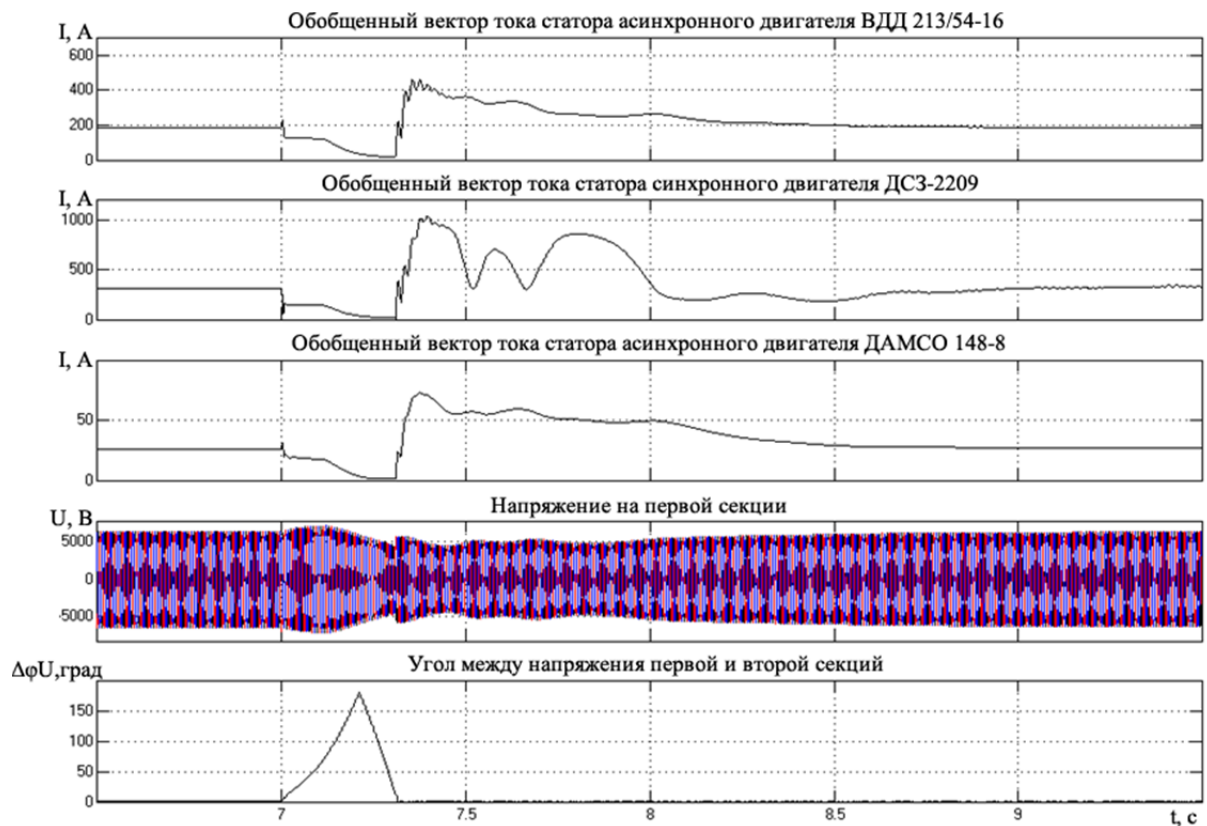


Рисунок 4.9 – Графики изменения токов статоров асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и ДАМСО 148-8 мощностью 240 кВт, синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт при синфазном включении резервного источника питания

Из рисунка 4.9 следует, что после перерыва питания длительностью 0.316 секунды уровень напряжения на секции снизился до 70% от номинального и фаза напряжения резервного источника питания совпала с фазой остаточного напряжения на секции. При подаче резервного питания в этот момент времени

значения кратности тока самозапуска относительно номинального тока для синхронного двигателя (СД1) составила 3.3 о.е., для асинхронного двигателя (АД1) 2.5 о.е. и для асинхронного двигателя (АД2) 2.8 о.е. Такой режим переключения на резервный источник является более благоприятным, так как, не смотря на более длительный перерыв питания уровень токов самозапуска и моментов оказался значительно ниже, чем в случае несинхронной подачи резервного напряжения.

В зависимости от длительности перерыва питания, механических постоянных электродвигателей, коэффициентов загрузки, параметров двигателей и самой сети синфазная подача напряжения может быть как успешной, так и неуспешной. Результаты моделирования таких режимов с разными коэффициентами загрузки асинхронного и синхронного электродвигателей приведены на рисунке 4.10 и рисунке 4.11.

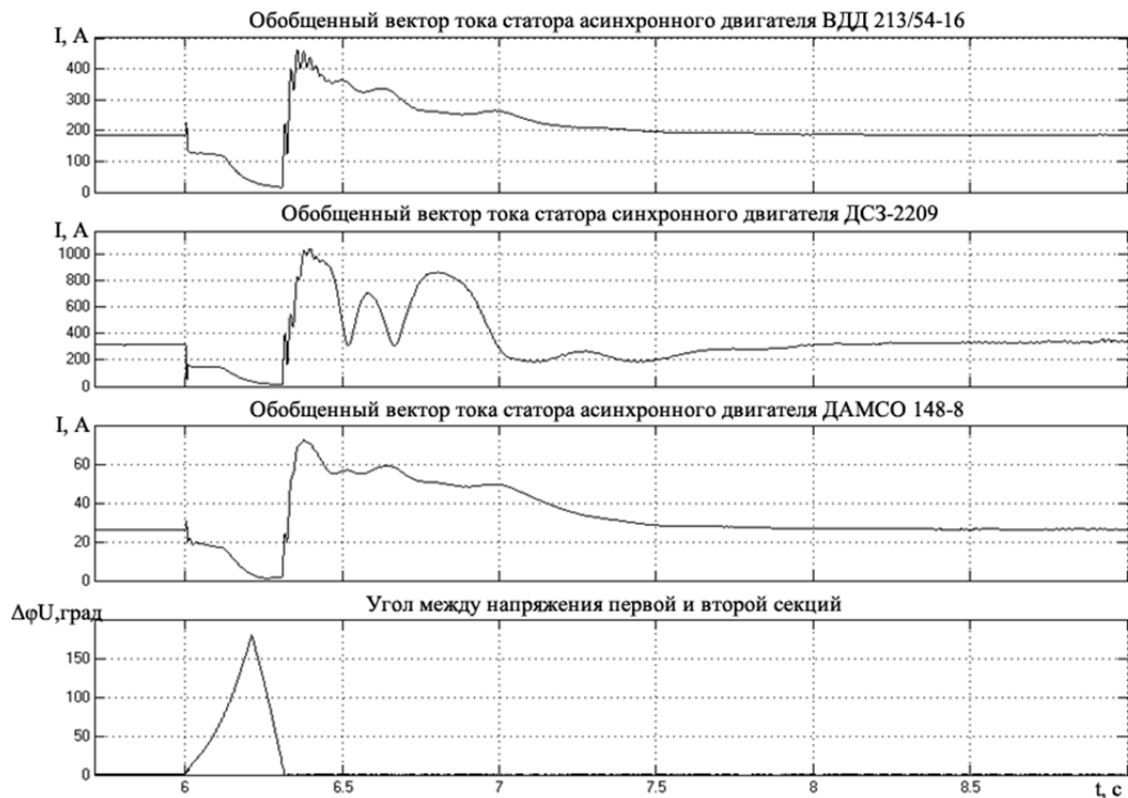


Рисунок 4.10 – Характер изменения токов статоров асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и ДАМСО 148-8 мощностью 240 кВт, синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт и угла между векторами напряжений при успешной синфазной подаче питания

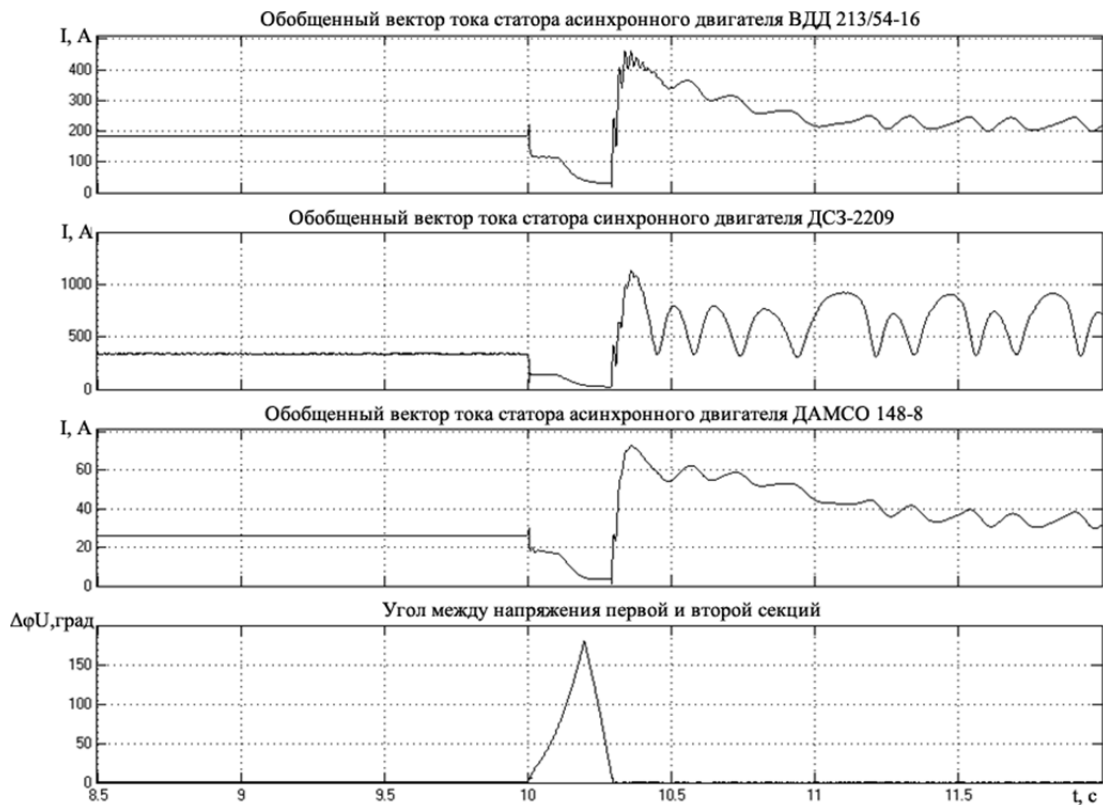


Рисунок 4.11 – Характер изменения токов статоров асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и ДАМСО 148-8 мощностью 240 кВт, синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт и угла между векторами напряжений при синфазной неуспешной подаче питания

Большая нагрузка синхронного двигателя в опыте (Рисунок.4.11) привела к тому, что после потери питания и подаче синфазного напряжения синхронный двигатель не втянулся в синхронизм и в дальнейшем он будет отключен своими защитами.

В связи с вышесказанным необходимо рассмотреть возможность переключения на резервный источник напряжения соответствующую по быстрдействию критерию предотвращения выпадения из синхронизма синхронных электродвигателей двигателей с большими коэффициентами загрузки.

Поскольку значения токов и моментов зависят от угла между напряжениями секций основного и резервного источников питания, то средствами математического моделирования могут быть выполнены расчёты начальных



мгновенных значений токов и моментов двигателей в опытах включения резервного питания в системе электроснабжения (Рисунок 4.1). Диапазон углов рассогласования между напряжениями принят от  $0^0$  до  $360^0$ . Результаты таких расчетов обобщены и приведены на рисунке 4.12 для асинхронного двигателя ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт напряжением 6 кВ.

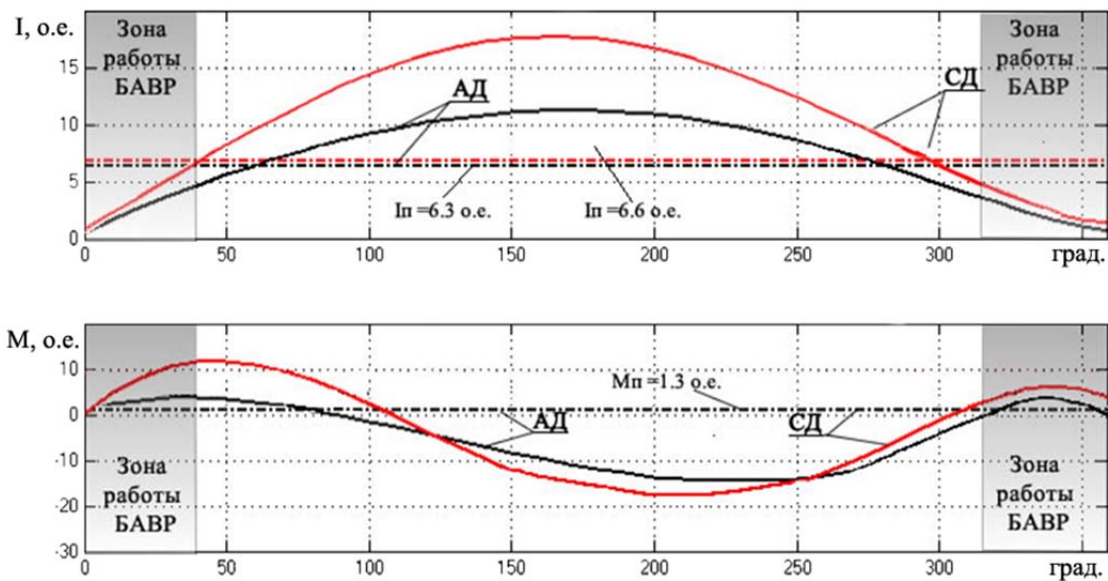


Рисунок 4.12 – Графики зависимостей токов и электромагнитных моментов асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт от угла включения резервного источника питания.

Из рисунка 4.12 видно, что наибольшие значения токов в двигателях возникают при повторных включениях резервного питания с углом рассогласования  $180^0$ , а моментов при  $210^0$ . При этом допустимые значения углов включения для асинхронного двигателя находятся в зоне углов от  $0^0$  до  $60^0$  и от  $320^0$  до  $360^0$ , а для синхронного двигателя от  $0^0$  до  $40^0$  и от  $320^0$  до  $360^0$ . Из этих данных следует, что при использовании современных быстродействующих выключателей со временем включения порядка 0.02 секунды может рассматриваться вариант включения резервного источника питания при углах

рассогласования до  $40^0$ , что существенно облегчает условия самозапуска электродвигателей и увеличивает устойчивость их работы.

4.2.2 Исследование процессов в электромеханическом комплексе, обусловленных реализацией функции автоматического включения резерва электроснабжения при возникновении аварийных режимов в сети внешнего электроснабжения

Рассмотрим режим внешнего трехфазного короткого замыкания на высшей стороне трансформатора Т1 (Рисунок 4.1) и его отключения штатной релейной защитой. Результаты моделирования такого режима показаны на рисунке 4.13.

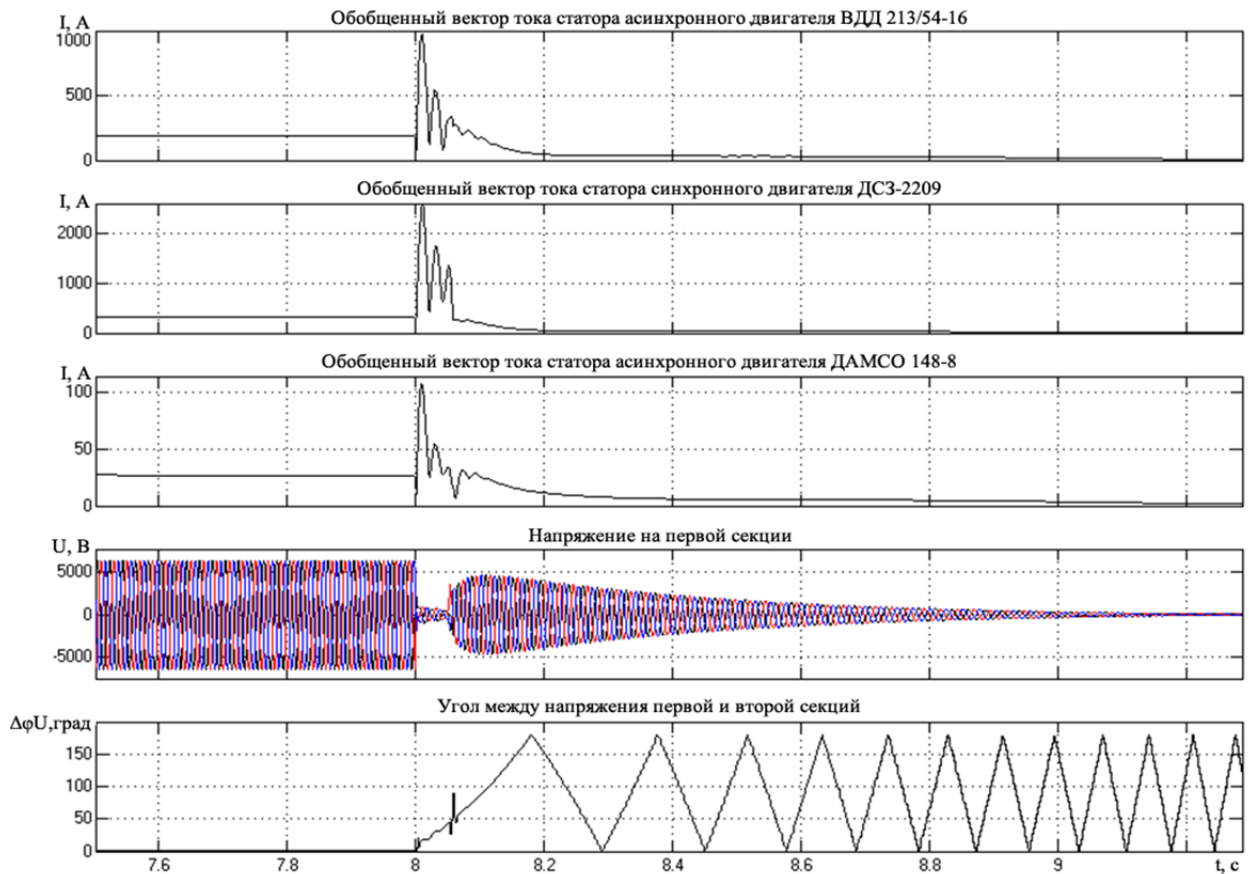


Рисунок 4.13 – Графики изменения токов статоров двигателей асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт, напряжения на шинах и у угла между напряжениями при коротком замыкании и его отключении

В момент возникновения трехфазных коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения напряжение на секции резко снижается, а двигатели переходят в генераторный режим, осуществляя подпитку места короткого замыкания. При этом значения мгновенного (ударного) тока, как и момента, могут существенно превышать номинальные. Причиной этого является то, что некоторое время ЭДС двигателей может оставаться на достаточно высоком уровне, постепенно затухая. При отключении короткого замыкания напряжение на секции восстанавливается до уровня близкого по значению к генерируемой двигателями ЭДС (Рисунок 4.13). Включение резервного питания здесь тоже может происходить с различными углами после отключения короткого замыкания.

Так, на рисунке 4.14 показано моделирование режима переключения на резервный источник питания после отключения быстродействующим вводным выключателем секции короткого замыкания от сигнала релейной защиты.

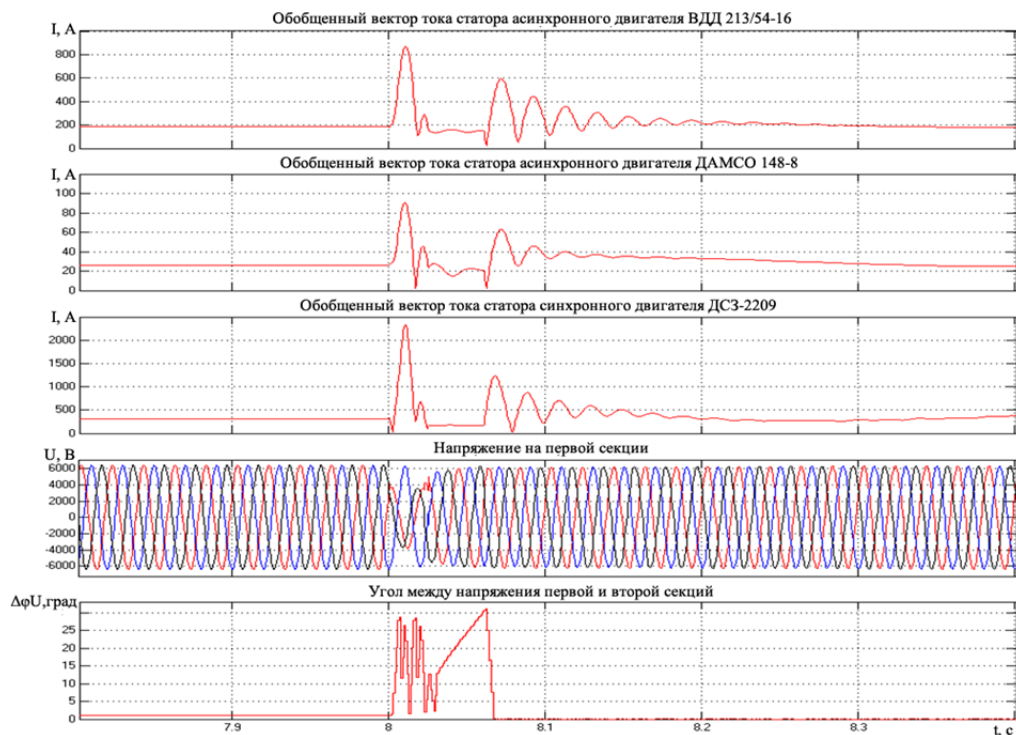


Рисунок 4.14 – Графики изменения токов статоров асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДС3-2209 мощностью 2460 кВт, напряжения на шинах и угла между напряжениями при переключении на резервный источник питания

Из рисунка 4.14 следует, что при таком переключении длительность перерыва питания составила 0.067 секунды, а включение секционного выключателя произошло до достижения углом рассогласования  $32^{\circ}$ . В таком режиме БАВР является успешным, однако оно может быть реализовано только при использовании быстродействующих высоковольтных выключателей.

При включении резервного источника питания при углах рассогласования между напряжениями менее  $60^{\circ}$  токи самозапуска и моменты в двигателях не будут превышать допустимых пусковых значений. Поэтому для успешной работы устройств БАВР в этих режимах требуется контроль угла рассогласования напряжений между основным и резервным источниками питания и выполнение подачи резервного напряжения до того, как угол между напряжениями достигнет  $60^{\circ}$ . Для реализации такого режима необходимо учитывать время достижения углом рассогласования предельного значения, а также собственное время работы выключателя, будь-то обычный выключатель со временем срабатывания равным 0.2–0.3 секунды или быстродействующий выключатель со временем срабатывания равным 0.022 секунды. Если суммарное время работы устройства БАВР и время включения выключателя меньше времени достижения углом рассогласования предельного значения, то применение устройств БАВР будет успешным. В противном случае, необходима проверка допустимости синфазной подачи резервного напряжения. Таким образом, средствами разработанного аппарата математического моделирования может быть установлена успешность применения различных устройств БАВР в существующих схемах с учетом характеристик коммутационного оборудования.

#### 4.3 Исследование функциональных возможностей БАВР средствами математического моделирования

Рассмотрим работу устройства БАВР на примере его математической модели. В качестве пусковых органов при потере питания, не вызванной короткими замыканиями, примем контроль величины угла между векторами

напряжений основной и резервной секции, а также контроль наличия тока на вводе секции основного и резервного источников питания.

Пусковым органом при возникновении коротких замыканий прием контроль направления мощности прямой последовательности на вводе секции, которая определяется на основе фазных токов и напряжений с помощью направленного реле мощности с углом максимальной чувствительности  $90^0$ .

С помощью математической модели двухтрансформаторной подстанции, показанной на рисунке 4.1 рассмотрим работу устройства БАВР в различных аварийных режимах, вызванных как короткими замыканиями, так и отключением питающих линий. В качестве коммутационных устройств для моделирования режимов работы устройства БАВР были приняты быстродействующие вакуумные выключатели со временем включения 22 мс и временем отключения 10 мс [101].

На рисунке 4.15 приведены результаты моделирования процессов, обусловленных функционированием устройства БАВР в режиме восстановления напряжения после отключения трехфазного короткого замыкания на высшей стороне трансформатора Т1 (Рисунок 4.1).

Из рисунка 4.15 видно, что при возникновении трехфазного короткого замыкания в момент времени  $t=8$  секунд напряжение на секции резко снижается. В момент времени  $t=8.001$  секунд срабатывает пусковой орган направления мощности устройства БАВР и дает команду на отключение вводного выключателя первой секции шин 6 кВ. В момент времени  $t=8.011$  секунд после отключения вводного выключателя напряжение на секции повышается до уровня остаточной ЭДС, генерируемой выбегающими двигателями. Одновременно с этим происходит проверка возможности быстрой подачи резервного питания и в момент времени  $t=8.025$  секунд подается команда на включение секционного выключателя. При  $t=8.047$  секунд включается секционный выключатель и происходит успешный самозапуск двигательной нагрузки. Таким образом, суммарное время выявления аварийного режима и переключения на резервный источник составило 0.047 секунды. Переключение на резервный источник было

выполнено по алгоритму быстрого переключения при достижении углом между векторами напряжений основной и резервной секций величины  $40^\circ$ .

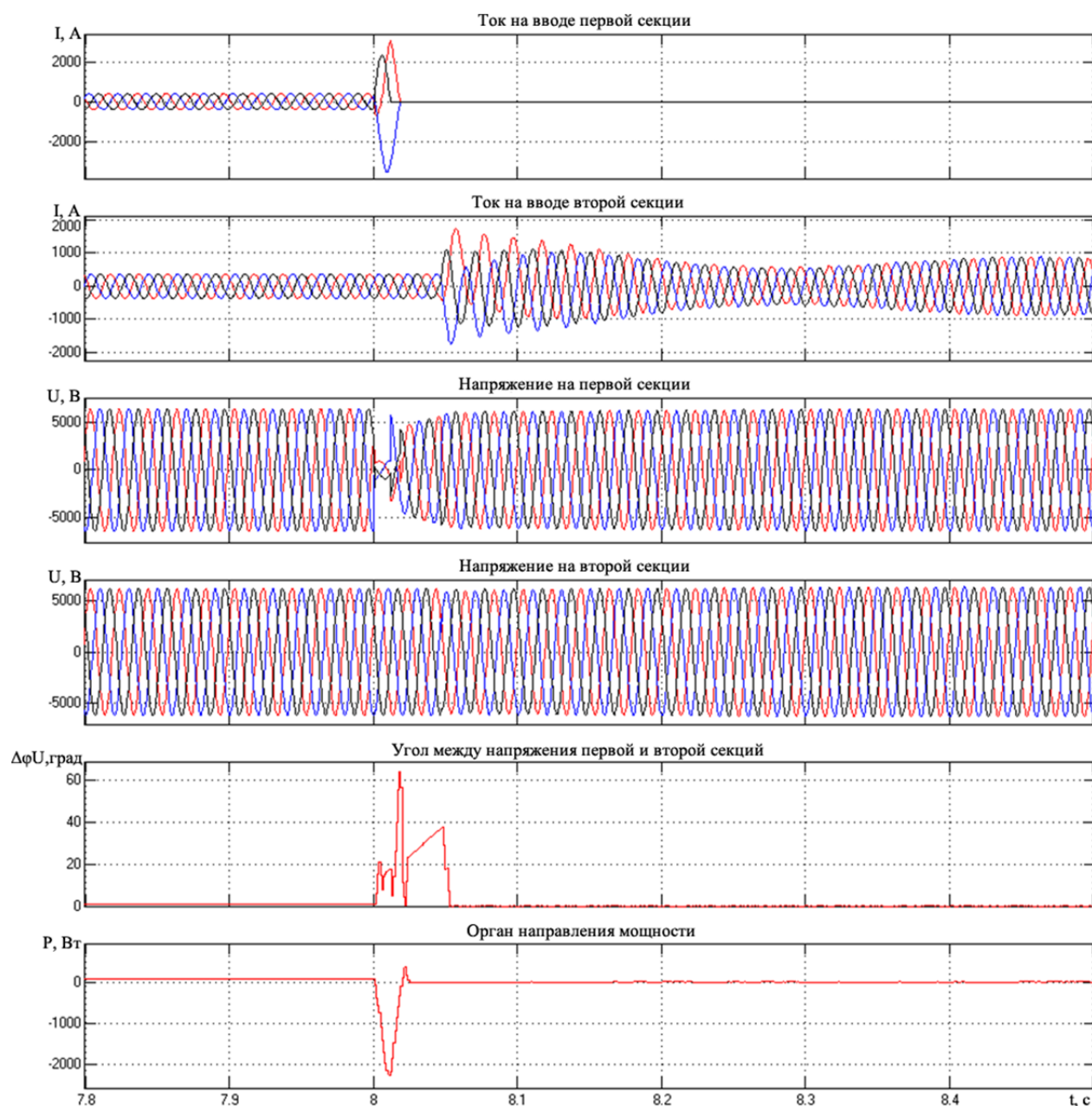


Рисунок 4.15 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАПР при возникновении внешнего трехфазного короткого замыкания и переключении на резервный источник питания

На рисунке 4.16 показаны графики обобщенных векторов статоров электродвигателей, подключенных к первой секции шин при возникновении внешнего трехфазного короткого замыкания и переключении на резервный источник питания.



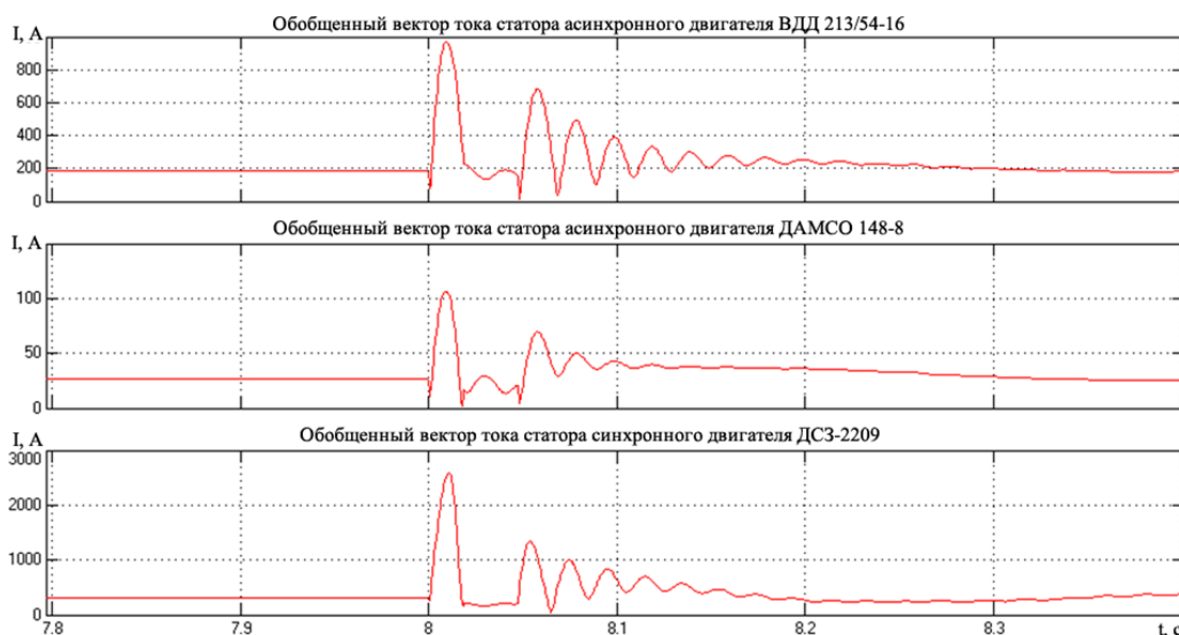


Рисунок 4.16 – Графики обобщенных векторов токов статора асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт первой секции шин при возникновении внешнего трехфазного короткого замыкания и переключении на резервный источник питания

В таблице 4.7 приведены пусковые токи двигателей АД1, АД2 и СД1 и токи самозапуска после переключения питания на резервный источник питания в результате работы устройства БАВР.

Таблица 4.7 – Пусковые токи и токи самозапуска при быстром переключении на резервный источник при внешнем трехфазном коротком замыкании

Двигатель	Пусковой ток, А	Ток в нормальном режиме, А	Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.
АД1	994	183	685	3,74
АД2	113	26	70	2,69
СД1	2125	314	1350	4,29

Из таблицы 4.7 видно, что уровни токов самозапуска двигательной нагрузки основной секции не превышают уровней пусковых токов и тем самым не

вызывают дополнительный нагрев обмоток электродвигателей в режиме самозапуска.

На рисунке 4.17 приведены результаты моделирования синхронного переключения на резервный источник питания после отключения внешнего трехфазного короткого замыкания.

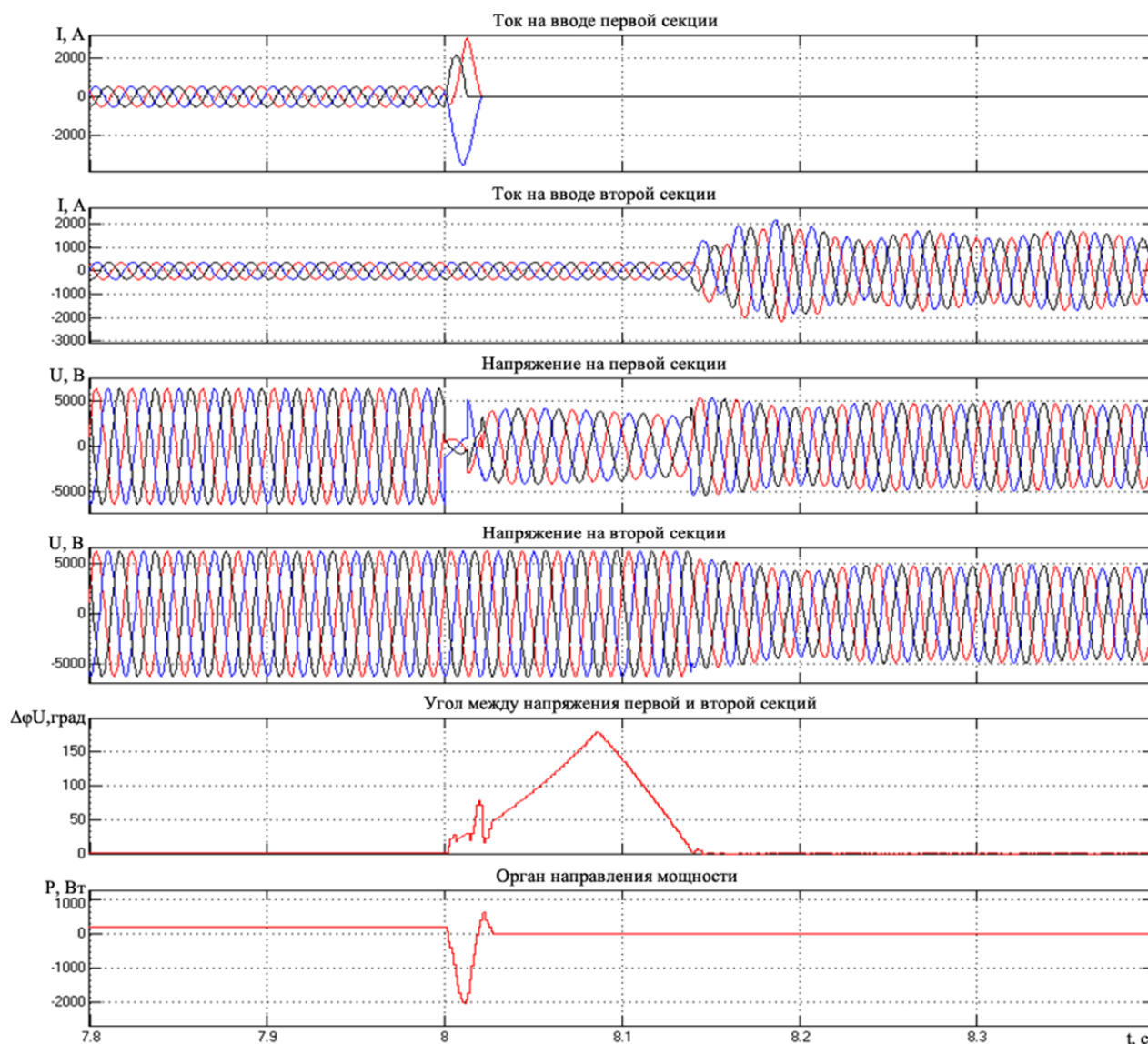


Рисунок 4.17 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАВР при синхронном переключении на резервный источник питания после отключения трёхфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения

Такой режим переключения может возникнуть в случае, когда электродвигатели имеют небольшой коэффициент загрузки. В этом случае изменение величины угла между векторами основного и резервного источников



питания происходит гораздо быстрее и алгоритм быстрого переключения не успевает сработать и переключение на резервный источник происходит при первом совпадении фаз остаточного напряжения на основной секции и напряжения резервной секции. В этом режиме время определения появления аварийного режима во внешней сети электроснабжения и отключение вводного выключателя совпадают с временами при работе устройства БАВР при быстром переключении, а вот команда на включение секционного выключателя подается с учетом времени работы выключателя в момент времени  $t=8.117$  секунд, секционный выключатель включается в момент времени  $t=8.139$  секунд. При этом перерыв питания составляет 0.139 секунды.

На рисунке 4.18 приведены графики изменения обобщенных векторов статоров двигателей АД1, АД2 и СД1 при таком переключении. В таблице 4.8. приведены значения токов самозапуска двигательной нагрузки первой секции при синхронном переключении электропитания на резервный источник питания после отключения трехфазного короткого замыкания.

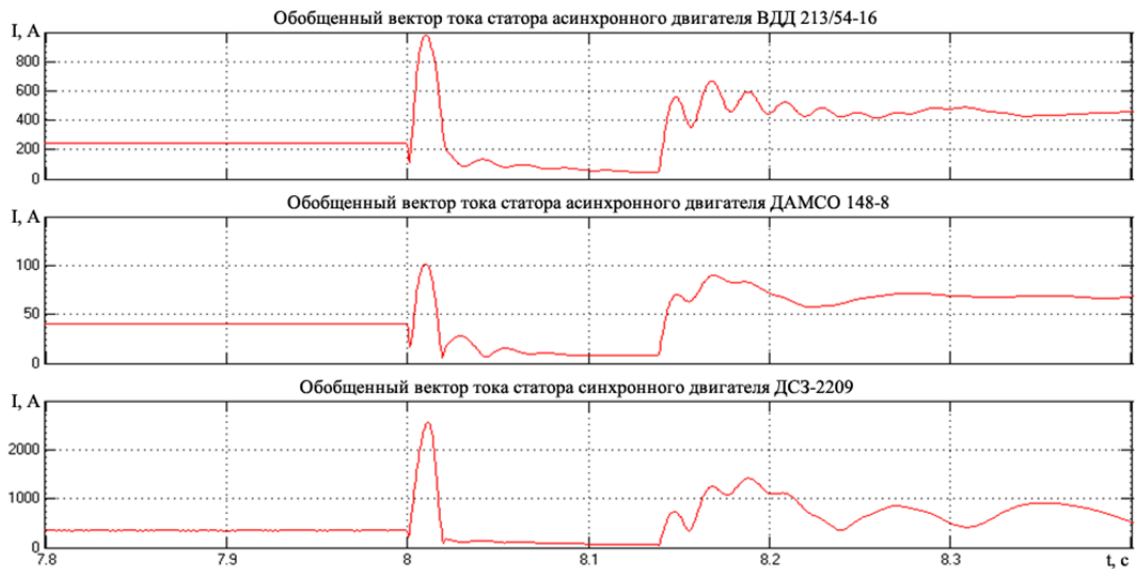


Рисунок 4.18 – Графики обобщенных векторов токов асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт первой секции шин при синхронном переключении на резервный источник питания после отключения трёхфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения

Таблица 4.8 – Пусковые токи и токи самозапуска при синфазном переключении на резервный источник электроснабжения

Двигатель	Пусковой ток, А	Ток в нормальном режиме, А	Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.
АД1	994	183	665	3,6
АД2	113	26	90	3,46
СД1	2125	314	1420	4,52

Как видно из таблицы 4.8 при синфазном переключении, как и при быстром (приближенном к мгновенному) переключении, уровни токов самозапуска не превышают уровня токов пускового режима и являются допустимыми.

На рисунке 4.19 приведены результаты работы устройства БАВР при внешнем двухфазном коротком замыкании.

Из рисунка 4.19 видно, что при возникновении двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения в момент времени  $t=8$  секунд напряжение на секции в одной фазе снижается практически до нуля, а в двух других снижается до 3400 В. В момент времени  $t=8.001$  секунд срабатывает пусковой орган направления мощности на вводе секции и дает команду на отключение вводного выключателя секции. Отключение вводного выключателя происходит в момент времени  $t=8.011$  секунд и срабатывает пусковой орган, определяющий потерю питания в момент времени  $t=8.024$  секунд и дает команду на включение секционного выключателя, а в момент времени  $t=8.046$  секунд происходит включение секционного выключателя и двигатели переходят в режим самозапуска. Время перерыва питания в этом случае составило 0.046 секунды. Включение секционного выключателя произошло при достижении углом между векторами напряжений основной и резервной секции значения  $33^0$ .

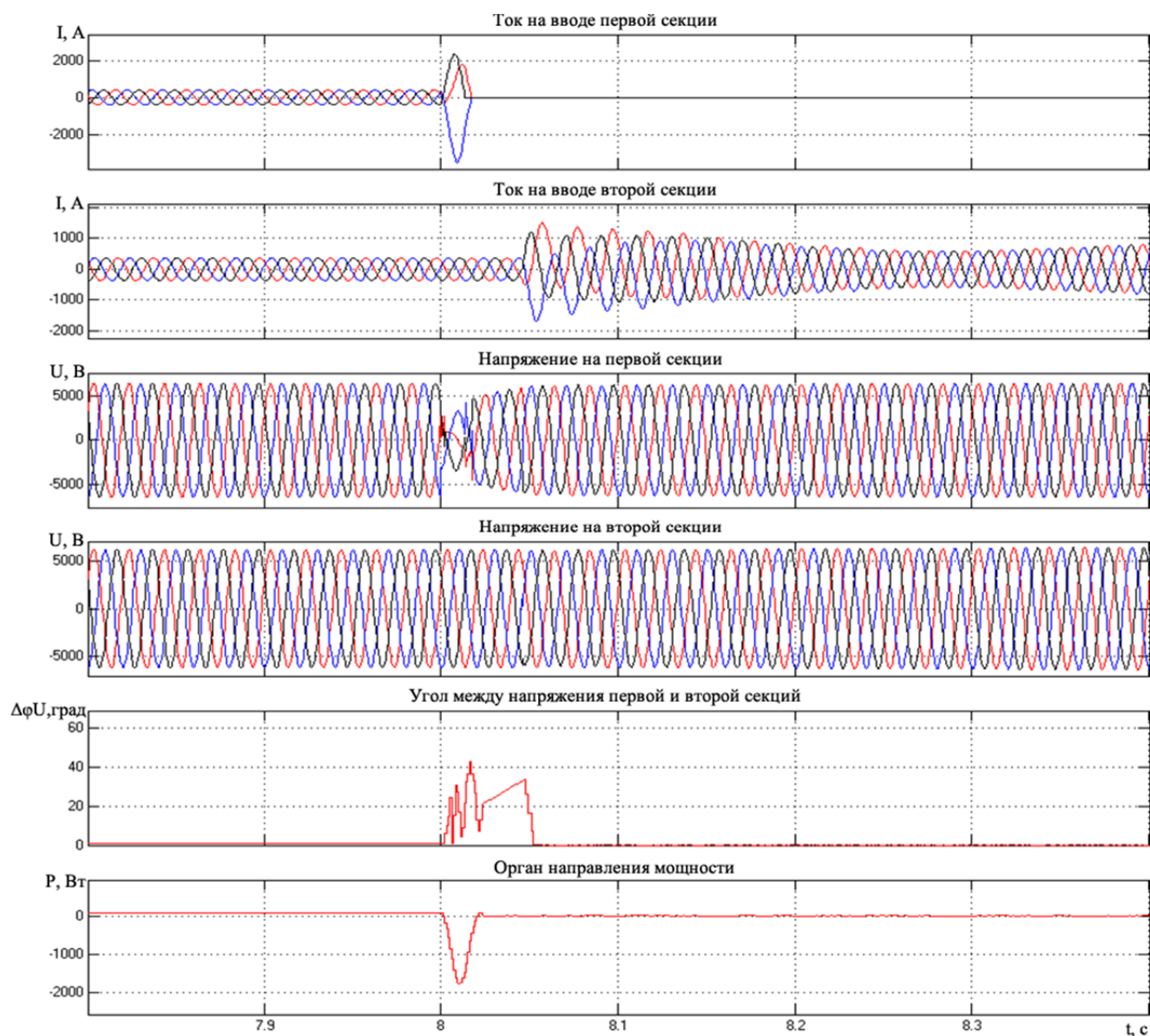


Рисунок 4.19 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАВР при внешнем двухфазном коротком замыкании и переключении на резервный источник питания

На рисунке 4.20 приведены графики изменения обобщенных векторов токов статоров электродвигателей при внешнем двухфазном коротком замыкании и переключении на резервный источник питания.

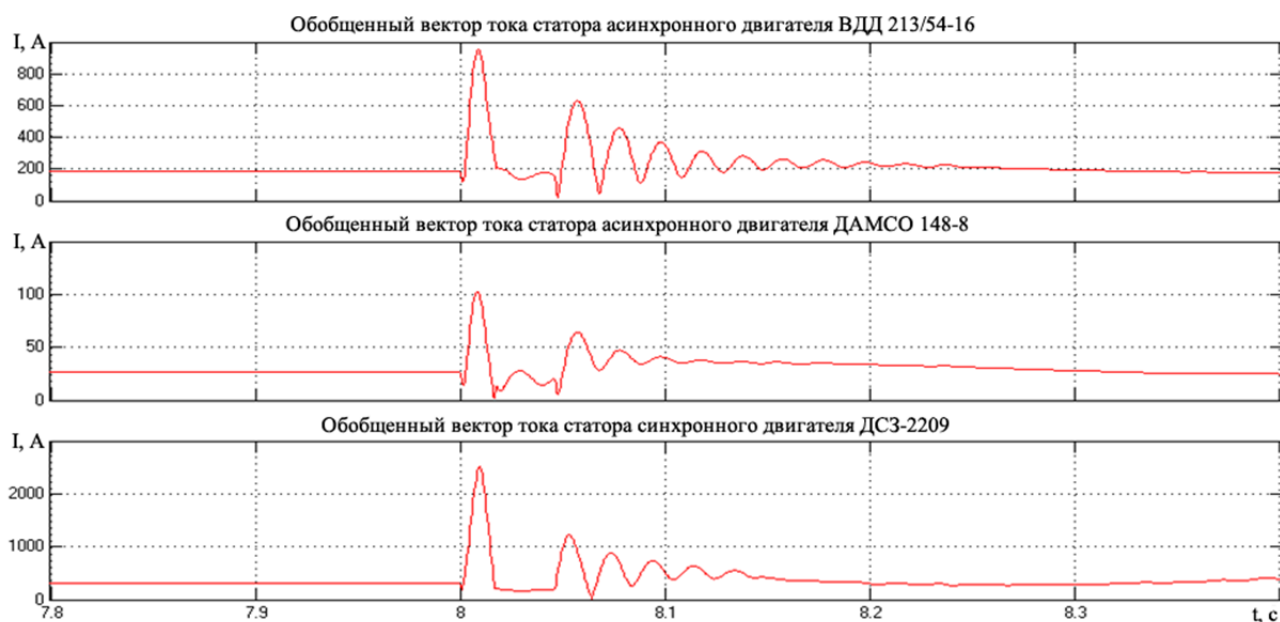


Рисунок 4.20 – Графики обобщенных векторов токов статора асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт первой секции шин v

В таблице 4.9. приведены значения токов самозапуска двигателей электромеханического комплекса при переключении после двухфазного короткого замыкания во внешней сети.

Таблица 4.9 – Пусковые токи и токи самозапуска при быстром переключении на резервный источник при внешнем двухфазном коротком замыкании

Двигатель	Пусковой ток, А	Ток в нормальном режиме, А	Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.
АД1	994	183	630	3,4
АД2	113	26	64	2,5
СД1	2125	314	1215	3,9

По данным таблицы 4.9 видно, что уровни токов самозапуска являются меньшими, чем токи самозапуска, после отключения внешнего двухфазного короткого замыкания, что вызвано меньшим снижением уровня напряжения и меньшим значением угла рассогласования между напряжениями секций основного и резервного источников питания.

На рисунке 4.21 показаны результаты работы устройства БАВР электроснабжения электромеханического комплекса при однофазном коротком замыкании в питающей сети.

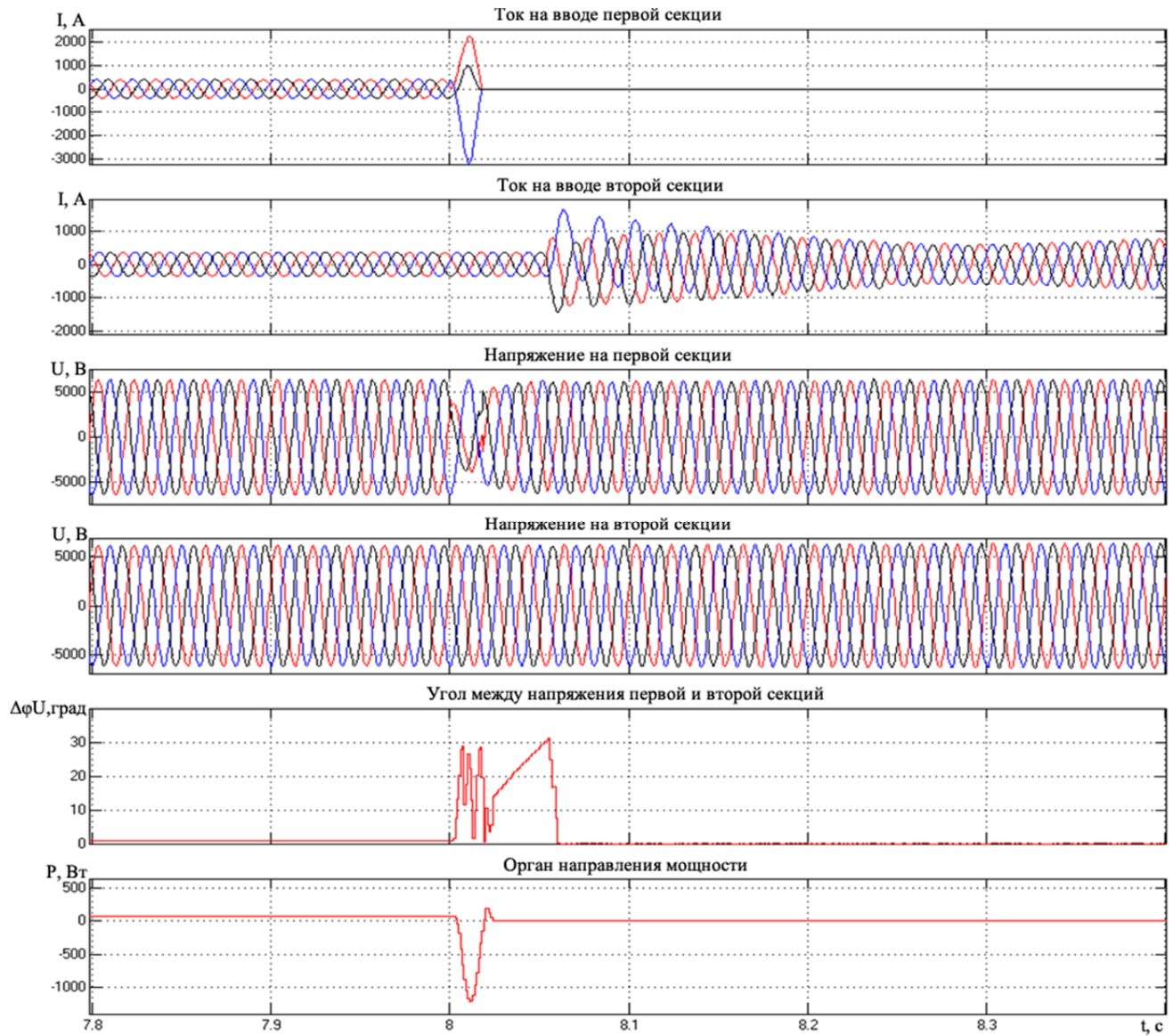


Рисунок 4.21 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАВР при внешнем однофазном коротком замыкании и переключении на резервный источник питания

Из рисунка 4.21 видно, что при возникновении однофазного короткого замыкания в питающей сети в момент времени  $t=8$  секунд пусковой орган устройства БАВР срабатывает в момент времени  $t=8.004$  секунд и подает команду на отключение вводного выключателя секции. Запуск пускового органа, определяющего потерю питания происходит в момент времени  $t=8.032$  секунд,

после чего в момент времени  $t=8.054$  секунд включается секционный выключатель. Время перерыва питания в данном режиме составило 0.054 секунды. Угол включения составил  $31^{\circ}$ .

На рисунке 4.22 приведены графики изменения обобщенных векторов токов статоров электродвигателей при внешнем однофазном коротком замыкании и переключении на резервный источник питания, а в таблице 4.10 приведены значения токов самозапуска двигателей электромеханического комплекса при рассмотренном переключении на резервный источник питания.

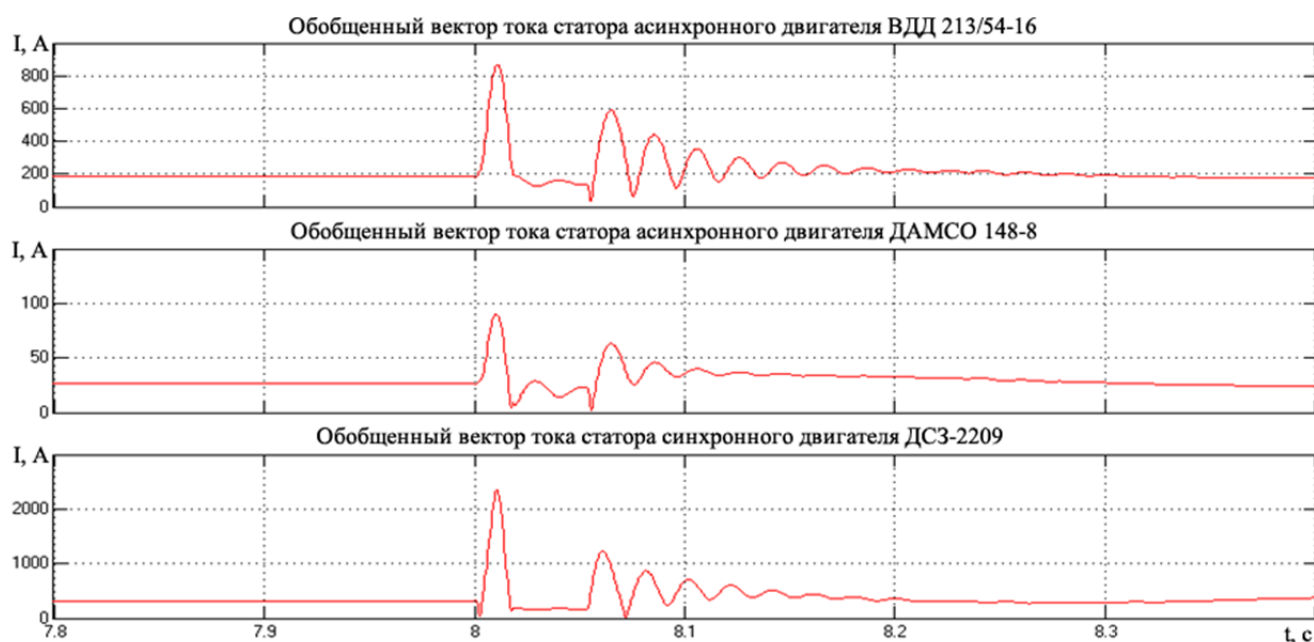


Рисунок 4.22 – Графики обобщенных векторов токов статора асинхронных двигателей ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт и синхронного двигателя ДСЗ-2209 мощностью 2460 кВт первой секции шин при внешнем однофазном коротком замыкании и переключении на резервный источник питания

Таблица 4.10 – Пусковые токи и токи самозапуска при быстром переключении на резервный источник при внешнем однофазном коротком замыкании

Двигатель	Пусковой ток, А	Ток в нормальном режиме, А	Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.
АД1	994	183	590	3,2
АД2	113	26	63	2,4
СД1	2125	314	1225	3,9



Из таблицы 4.10 видно, что, несмотря на более длительный перерыв питания, по сравнению с режимами трехфазного и двухфазного коротких замыканий уровень токов самозапуска оказался наименьшим из-за незначительного снижения уровня питающего напряжения на секции.

Рассмотрим теперь режимы работы устройства БАПР в режимах потери питания, не связанных с короткими замыканиями. Так на рисунке 4.23 приведены результаты моделирования режима быстрого (приближенного к мгновенному) переключения на резервный источник при отключении основного источника питания.

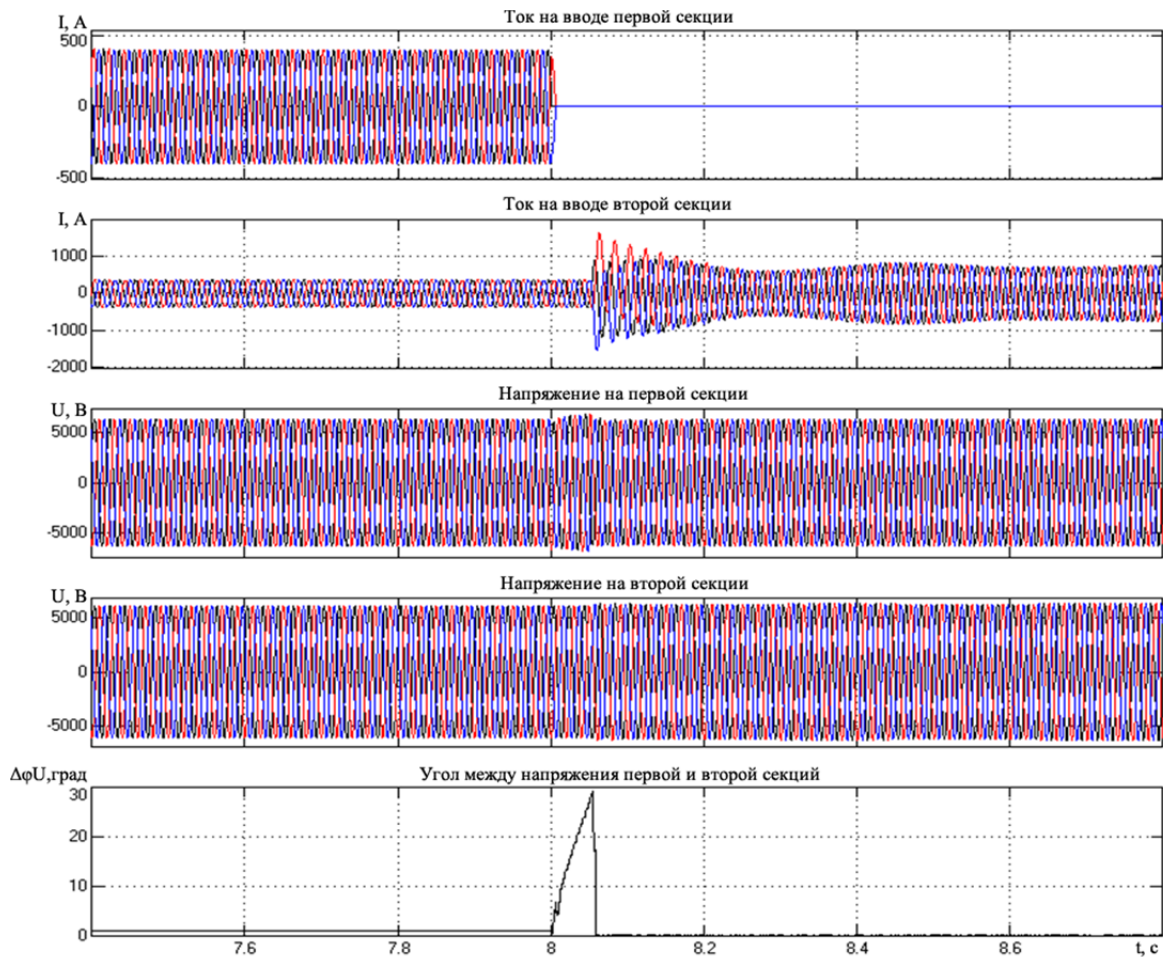


Рисунок 4.23 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАПР при быстром (приближенном к мгновенному) переключении на резервное электроснабжение

Из рисунка 4.23 видно, что переключение на резервный источник электроснабжения произошло за время 0.053 секунды, время реакции пускового

органа на потерю питания составило 0.031 секунды, а угол между векторами напряжений в момент включения резервного источника питания составил  $29^0$ .

На рисунке 4.24 показаны результаты моделирования режима синхронного переключения на резервный источник питания.

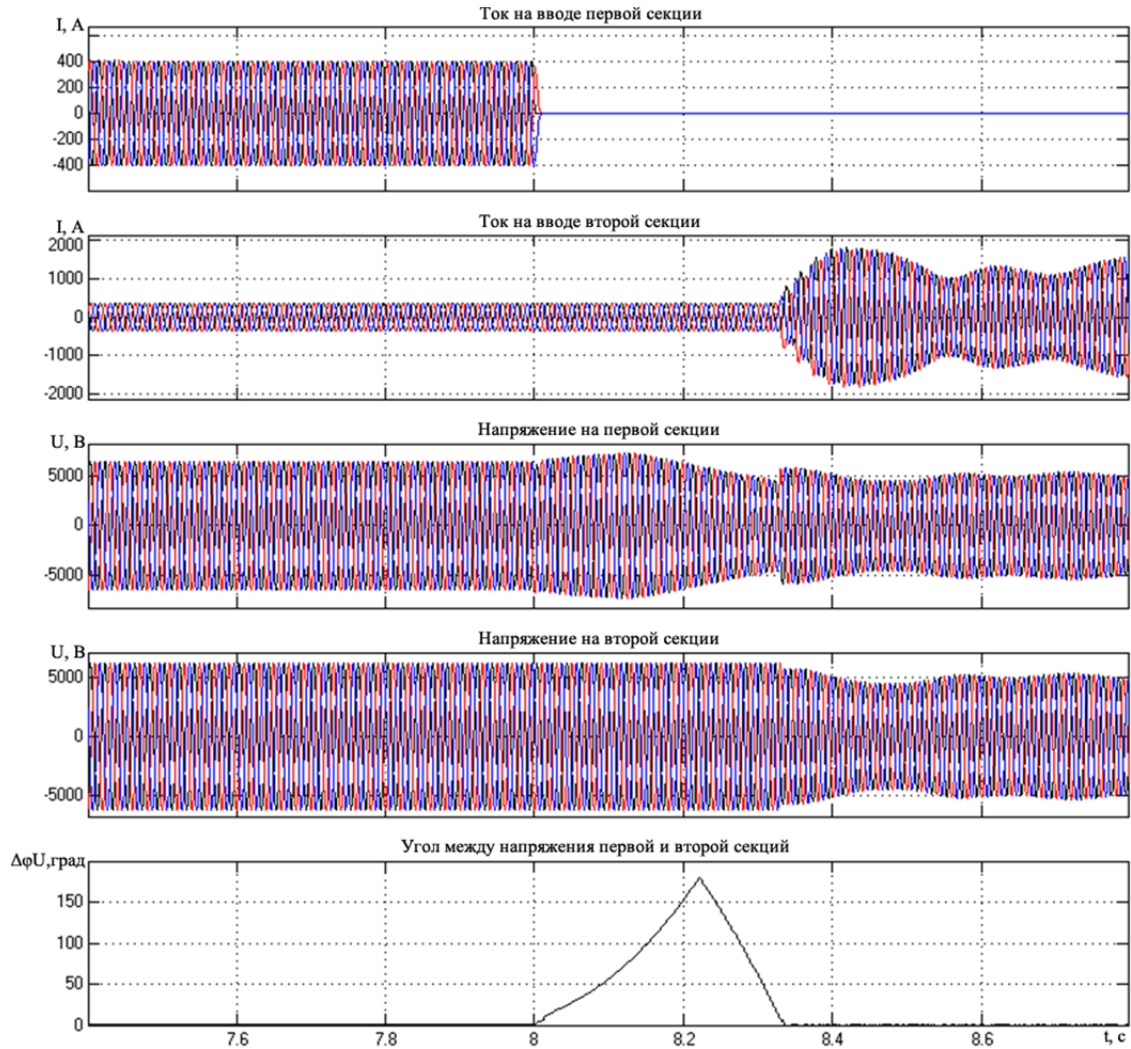


Рисунок 4.24 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов БАВР при синхронном переключении на резервный источник электропитания

При реализации алгоритма синхронного переключения на резервный источник время перерыва питания, как видно из рисунка 4.24 составляет 0.33 секунды.

Величина токов самозапуска электродвигателей в режимах быстрого (приближенном к мгновенному) и синхронного переключений приведены в таблице 4.11.



Таблица 4.11 – Токи самозапуска двигательной нагрузки

Двигатель	В Ток нормальном режиме, А	Быстрое переключение		Синхронное переключение	
		Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.	Ток самозапуска, А	Кратность тока самозапуска относительно тока нормального режима, о.е.
АД1	183	590	3,2	440	2,4
АД2	26	60	2,3	70	2,6
СД1	314	1245	3,9	1000	3,2

Как правило, устройства БАВР не должны срабатывать при возникновении коротких замыканий на секции и при коротких замыканиях на отходящих присоединениях. На рисунке 4.25 показаны графики изменения токов, напряжений и пусковых органов устройства БАВР при возникновении короткого замыкания на секции длительностью 0.5 секунды.

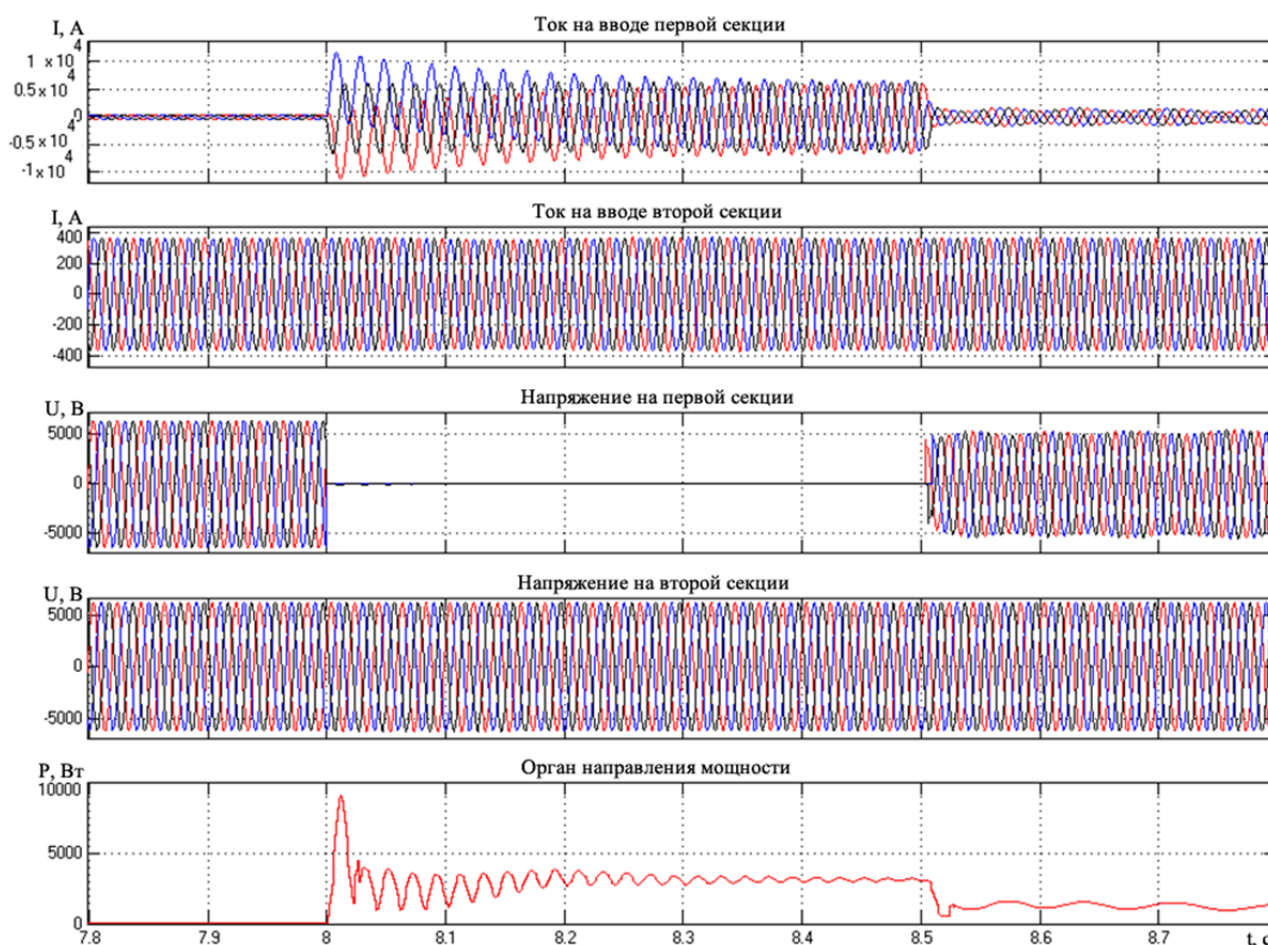


Рисунок 4.25 – Графики токов, напряжений сети пусковых органов устройства БАВР при возникновении короткого замыкания на первой секции

Из рисунка 4.25 видно, что при возникновении короткого замыкания на секции пусковой орган направления мощности не срабатывает из-за того, что мощность на вводе не меняет своего направления, а пусковой орган контроля угла между напряжениями секций, несмотря на снижение напряжения на секции до 0, не срабатывает, так как на вводе секции протекает ток короткого замыкания.

На рисунке 4.26 показаны графики изменения токов и напряжений, а также пусковых органов БАВР при возникновении короткого замыкания на отходящем присоединении 6 кВ.

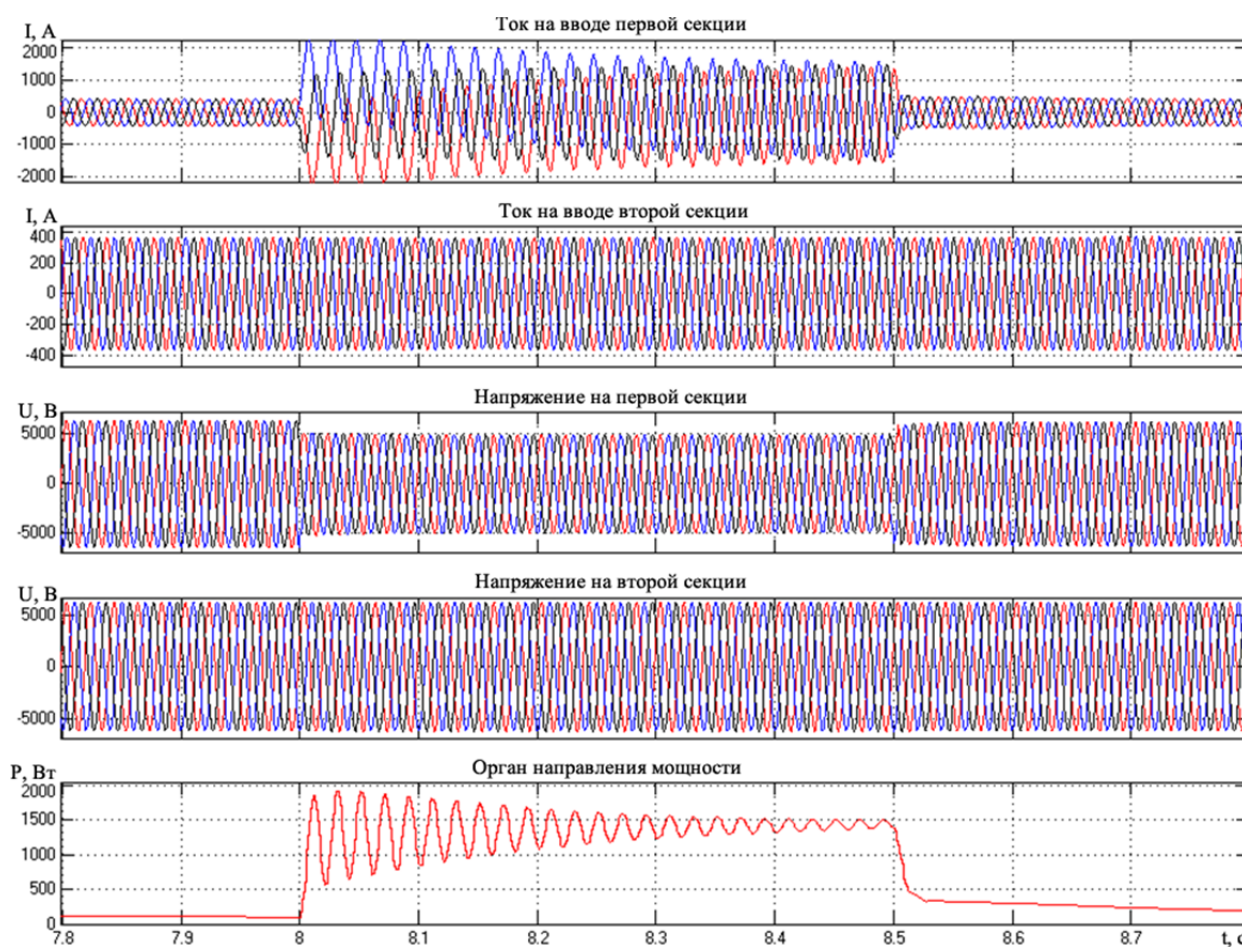


Рисунок 4.26 – Графики токов, напряжений сети и пусковых органов устройства БАВР при возникновении короткого замыкания на отходящем присоединении первой секции

Как видно из рисунка 4.26 при возникновении короткого замыкания на отходящем присоединении 6 кВ реле направления мощности не срабатывает, так как и в случае короткого замыкания на секции направление мощности на вводе

секции не меняет своего направления, а угол между векторами напряжений практически не изменяется.

В таблице 4.12 показано время переключения на резервный источник электропитания многомашинного электромеханического комплекса в различных режимах с помощью автоматической системы управления переключением на резервное напряжение.

Таблица 4.12 – Время переключения на резервный источник электропитания в различных режимах.

Причина потери питания	Трёхфазное КЗ	Двухфазное КЗ	Однофазное КЗ	Быстрое переключение при потере питания	Синхронное переключение при потере питания
Время переключения, с	0,047	0,046	0,054	0,053	0,33

Из полученных результатов моделирования работы устройства быстродействующего автоматического включения резерва в аварийных режимах, вызванных короткими замыканиями в сети внешнего электроснабжения (Рисунок 4.15 – 4.22), а также отключениями вводного выключателя секции по другим причинам (Рисунок 4.25 и Рисунок 4.26) можно сделать вывод, что для наиболее быстрого восстановления нормального режима питания многомашинных электромеханических комплексов современные устройства автоматического управления переключением на резервное питание должны в своей структуре содержать пусковые органы, реагирующие на возникновение коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения и давать команду на отключение вводного выключателя секции, а подача резервного питания должна осуществляться с контролем угла рассогласования между напряжениями секций основного и резервного источников питания с целью ограничения уровня токов самозапуска на уровне, не превышающем уровня пусковых токов. Такой подход к формированию системы автоматического управления переключением на

резервный источник питания, как видно из таблицы 4.12, позволяет минимизировать время перерыва питания, что в свою очередь существенно облегчает условия самозапуска электродвигателей многомашинного электромеханического комплекса и обеспечивает их устойчивую работу.

#### 4.4 Выводы по разделу 4

1. Посредством математического моделирования выполнен анализ переходных процессов и обобщены результаты режимов работы БАВР в системах электроснабжения с крупными асинхронными и синхронными электродвигателями при коротких замыканиях и нарушениях электроснабжения в питающей сети, в результате чего были получены закономерности протекания переходных процессов, которые позволили установить поведение асинхронных и синхронных двигателей в режимах аварийной потери рабочего питания и переключения на резервный источник питания.

2. Разработанный метод и структурная модель объекта исследования позволили определить оптимальный диапазон допустимых углов включения (от  $0^0$  до  $60^0$ ) резервного питания системы электроснабжения технологического комплекса для обеспечения бесперебойности электроснабжения и соблюдения критериев минимизации: интервала перерыва электроснабжения, уровня снижения угловой скорости электродвигателей и не превышения токами и электромагнитными моментами электродвигателей пусковых значений.

3. Результаты математического моделирования разработанных пусковых органов устройства БАВР показывают высокую эффективность его работы в режимах потери питания, вызванных как, короткими замыканиями в сети внешнего электроснабжения, так и в режимах потери питания, не связанных с короткими замыканиями, что представляется целесообразным подтвердить экспериментально.

## РАЗДЕЛ 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 5.1 Обоснование структуры физической модели испытательного стенда

Для обеспечения надежного электроснабжения ответственных потребителей промышленные предприятия с непрерывным технологическим процессом, такие как системы собственных нужд тепловых и атомных электростанций, компрессорные подстанции газо- и нефтедобывающих предприятий, цеха предприятий химической и металлургической промышленности, должны получать питание от двух независимых источников питания, поскольку даже кратковременное нарушение нормального режима электроснабжения может привести к нарушению устойчивой работы двигательной нагрузки и расстройству сложного технологического процесса. Как правило, для обеспечения надежного электроснабжения на приведенных предприятиях электродвигатели многомашинных электромеханических комплексов получают питание от двухтрансформаторных подстанций, на которых устанавливаются устройства быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР).

В качестве контролируемых параметров режима сети устройства БАВР на таких подстанциях используют токи на вводах секций основного и резервного источников питания, а также напряжения на секциях основного и резервного источников питания, которые поступают в устройство БАВР от измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Поскольку принцип работы и характер физических процессов, протекающих в трехфазных электродвигателях в нормальных и переходных режимах, не отличаются у трехфазных электродвигателей разных классов напряжения, то для исследования работы разработанного устройства БАВР в

различных режимах работы был создан испытательный стенд напряжением 0.4 кВ двухтрансформаторной подстанции, питающей двигательную нагрузку в виде асинхронного двигателя АИР100L8 мощностью 1500 Вт, двух асинхронных двигателей АИР63В2 мощностью 550 Вт и асинхронного двигателя АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт. Схема испытательного стенда приведена на рисунке 5.1.

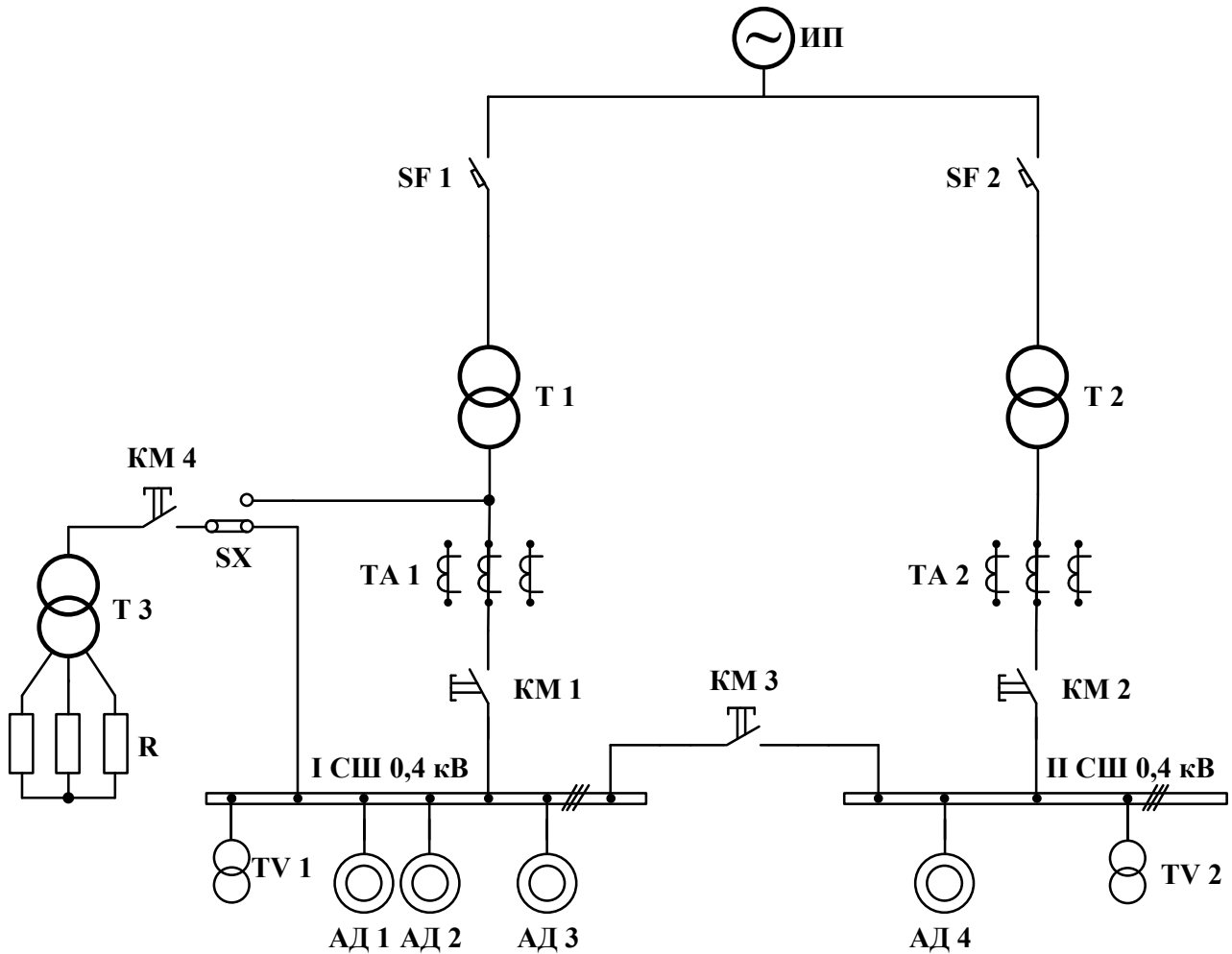


Рисунок 5.1 – Схема испытательного стенда

В нормальном режиме работы асинхронные двигатели АД1 – АД4 получают питание от двух питающих трансформаторов Т1 и Т2, подключенных через автоматические выключатели SF1 и SF2 к общему источнику питания. На стороне низкого напряжения трансформаторов Т1 и Т2 в каждой фазе установлены измерительные трансформаторы тока ТА1 (УТТ-5М) и ТА2 (УТТ-5), измеряющие токи на вводах первой и второй секции шин 0.4 кВ. Для измерения напряжений на секциях основного и резервного источников питания

используются измерительные трансформаторы напряжения TV1 и TV2. В качестве коммутационных аппаратов используются магнитные пускатели ПМА-5 (KM1) и ПМЕ-11 (KM2 – KM4) время включения, которых соответствует времени включения быстродействующих высоковольтных выключателей. Магнитные пускатели KM1 и KM2 выполняют функции вводных выключателей секций, а магнитный пускатель KM3 выполняет функцию секционного выключателя.

Режим потери питания основной секции на стенде имитируется выключением магнитного пускателя KM1, а резервной – отключением магнитного пускателя KM2.

Для физического моделирования коротких замыканий как во внешней сети (на высшей стороне трансформатора T1) так и на секции 0,4 кВ используются низкоомные сопротивления R, подключенные к стороне низкого напряжения трансформатора T3. Имитация возникновения короткого замыкания в сети выполняется включением магнитного пускателя KM4. Вид короткого замыкания может быть изменен путем изменения соединения низкоомных сопротивлений R. Изменить место короткого замыкания в сети можно изменением положения накладки SX.

Для исследования режимов работы разработанного устройства БАВР на приведенном стенде предусмотрены схемы управления магнитными пускателями KM1 – KM4, позволяющие включать их и отключать с помощью команд от выходных реле разработанного устройства БАВР, подающих сигналы на включение и отключение вводных магнитных пускателей KM1 и KM2, а также секционного магнитного пускателя KM3.

## 5.2 Разработка микропроцессорного устройства БАВР

Структурная схема разработанного в данной работе устройства БАВР представлена на рисунке 5.2, а его реализация осуществлена на базе микроконтроллера STM32F4 [102].

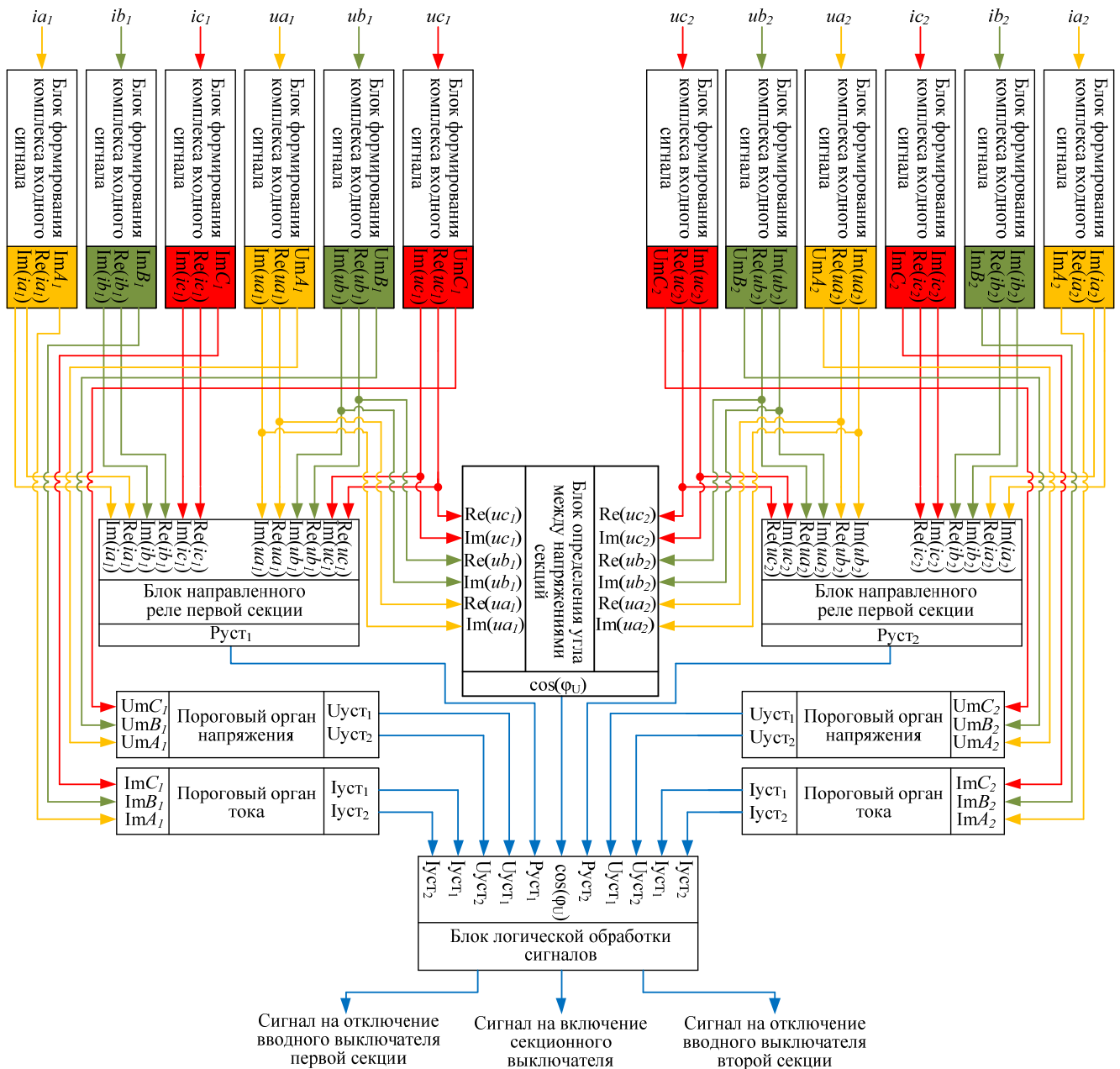


Рисунок 5.2 – Структурная схема устройства БАВР

Из рисунка 5.2 видно, что в состав разработанного устройства БАВР входят блоки формирования комплексных значений измеряемых сигналов, блоки направленных реле, предназначенные для определения появления аварийных режимов в сети внешнего электроснабжения, блок определения угла между напряжениями секций основного и резервного питания, блоки пороговых органов, а также блок логической обработки сигналов и выходных реле.



### 5.2.1 Измерительные органы устройства БАВР

Как правило, устройства БАВР выполняют постоянный контроль уровней токов на вводах секций основного и резервного источников питания, а также уровней напряжений на обеих секциях, для чего подключаются к измерительным трансформаторам тока и напряжения. Применение микропроцессорной техники для создания устройств защиты и автоматики требует выполнения преобразования аналоговых измеряемых сигналов тока и напряжения в дискретные цифровые сигналы для дальнейшей их обработки в микроконтроллере. Указанная операция выполняется с помощью аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), которые имеют достаточно низкие уровни опорных сигналов. Так, например, в используемом микроконтроллере STM32F4 [102] есть три встроенных 12-ти битных АЦП с уровнем опорного напряжения равным 3.3 В. Поэтому для преобразования аналогового сигнала тока от трансформатора тока в цифровой вид необходимо предварительно выполнить его преобразование в соответствующее ему напряжение с максимальным уровнем равным 3.3 В, который соответствует максимальному уровню тока, протекающему во вторичной цепи измерительного трансформатора тока.

Для выполнения указанного преобразования в разработанном устройстве БАВР используется датчик тока LEM LA 55-р представляющий собой компенсационный датчик, основанный на эффекте Холла [103]. Данный датчик предназначен для преобразования входного тока в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной и вторичной цепями. Внутренняя схема датчика приведена на рисунке 5.2. Первичный максимально допустимый ток датчика тока LEM LA 55-р составляет 50 А, а величина номинального вторичного тока составляет 50 мА. Согласно технической документации [103] время задержки датчика составляет менее 1 мкс, что делает возможным его применение в устройствах быстросрабатывающего автоматического включения резерва.

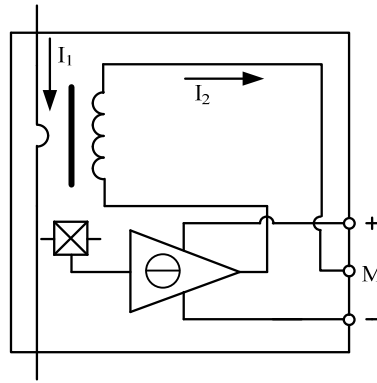


Рисунок 5.2 – Внутренняя схема датчика тока LEM LA 55-p

Для получения напряжения соответствующего сигналу выходного тока к датчику подключается нагрузочное сопротивление, величина которого зависит от величины напряжения питания датчика LEM LA 55-p, которое может быть либо  $\pm 12\text{В}$ , либо  $\pm 15\text{В}$ . Схема подключения нагрузочного сопротивления показана на рисунке 5.3.

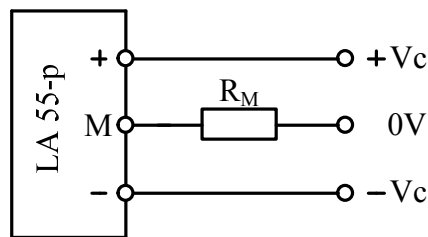


Рисунок 5.3 – Схема подключения нагрузочного сопротивления

Как правило, диапазон входных напряжений АЦП зависит от его опорного напряжения, поэтому для того, чтобы все измеряемые напряжения попали в диапазон АЦП необходимо применение масштабирующих схем, подгоняющих диапазон измеряемых напряжений под диапазон используемого АЦП. Для согласования диапазонов АЦП и измеряемых напряжений в данной работе используется схема с использованием микросхемы типа LM358, которая содержит в себе два независимых маломощных операционных усилителя с высоким коэффициентом усиления и частотной компенсацией. Схема микросхемы LM358 показана на рисунке 5.4, а схема ее подключения к датчику тока показана на рисунке 5.5.

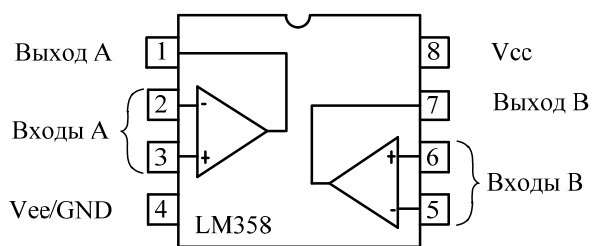


Рисунок 5.4 – Схема микросхемы LM358

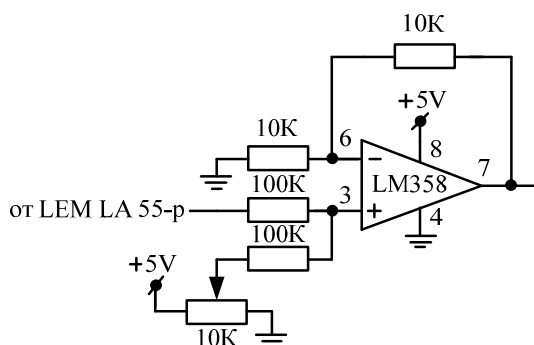


Рисунок 5.5 – Схема микросхемы LM358 к датчику тока.

Полная схема подключения одного датчика тока LEM LA 55-p к АЦП платы STM32F4Discovery показана на рисунке 5.6.

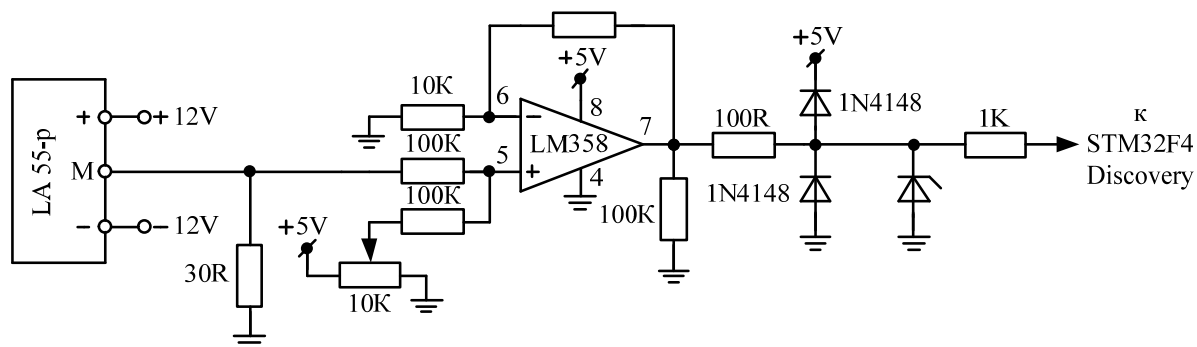


Рисунок 5.6 – Схема подключения датчика тока LEM LA 55-p к АЦП платы STM32F4Discovery

Так как устройство БАПР должно контролировать токи на вводах основной и резервной секций, то в состав устройства входит шесть датчиков тока LEM LA 55-p. Схема подключения каждого датчика к плате микроконтроллера производится согласно схеме, показанной на рисунке 5.6.

Поскольку датчики тока LEM LA 55-p требуют питание от источника  $\pm 12V$ , то для каждого датчика тока LEM LA 55-p предусмотрено питание по схеме,

которая преобразует переменное напряжение 220В в напряжение  $\pm 12В$ . Схема питания приведена на рисунке 5.7.

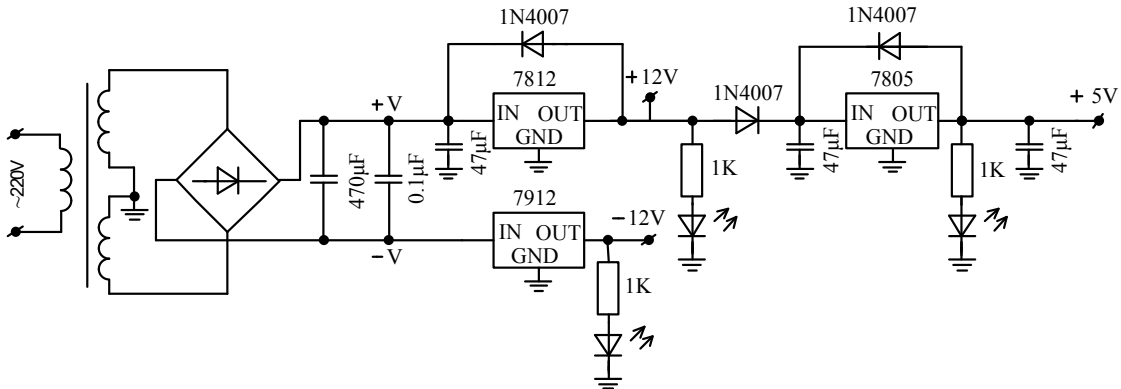


Рисунок 5.7 – Схема питания датчиков тока LEM LA 55-p

В качестве датчиков напряжения используются залитые трансформаторы напряжения НАНН BV2020160 мощностью 0.25 ВА, преобразующих напряжение 220В в напряжение 12В. Подключение данного трансформатора к АЦП микроконтроллера STM32 F4, как и в случае с датчиками тока для согласования диапазонов измеряемых напряжений и АЦП производится через микросхему LM358. Схема подключения микросхемы к трансформатору напряжения показана на рисунке 5.8.

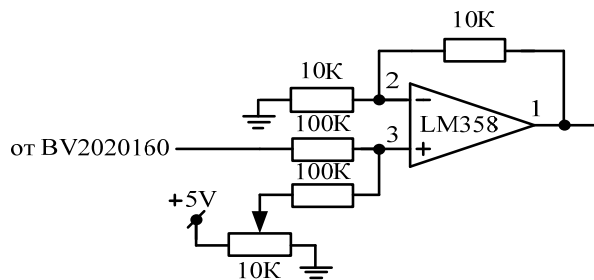


Рисунок 5.8 – Схема подключения микросхемы LM358 к трансформатору напряжения

Полная схема подключения трансформаторов напряжения BV2020160 к АЦП платы STM32 F4 Discovery показана на рисунке 5.9.

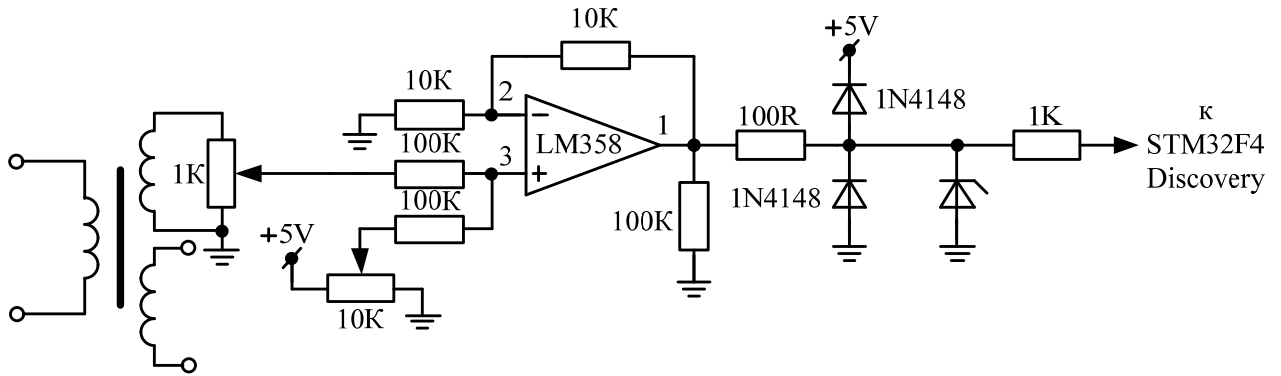


Рисунок 5.9 – Схема подключения трансформатора напряжения BV2020160 к АЦП платы STM32F4Discovery

Датчики тока и напряжения для удобства расположены на двух платах, каждая из которых содержит по три трансформатора напряжения BV2020160 соединенных между собой по схеме треугольник на стороне 220В, три датчика тока LEM LA 55-р и схему питания датчиков тока.

Схема подключения датчика тока LEM LA 55-р и трансформатора напряжения BV2020160 с использованием одной микросхемы LM358 для измерения тока и напряжения одной фазы показана на рис. 5.10.

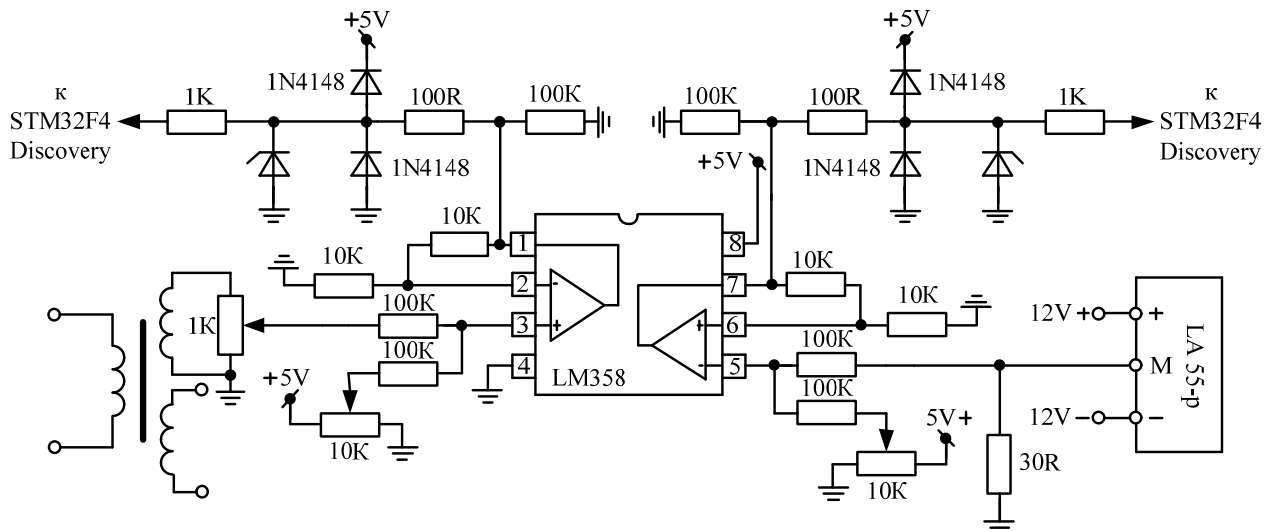


Рисунок 5.10 – Схема для измерения тока и напряжения одной фазы

### 5.2.2 Блок формирования комплексных значений входного сигнала

Работа блоков формирования комплексных значений входных сигналов токов и напряжений основана на алгоритмах, подробно описанных в разделе 3, а

также в [99, 100] и заключается в использовании усредненных значений входных сигналов и их центральных производных. Такой подход обеспечивает фильтрацию входных сигналов, так как, согласно [100], позволяет в переходных режимах ускорить затухание аperiodических составляющих сигналов и уменьшить влияние случайных помех. Как показано на рисунке 5.2, в структурной схеме содержится 12 таких блоков, входными сигналами которых являются сигналы от АЦП, а выходными – дискретные мгновенные значения реальной и мнимой частей комплексного числа и его амплитуда. Поскольку АЦП воспринимает однополярный сигнал, то для правильного измерения входного сигнала применяются масштабирующие схемы с использованием операционных усилителей, а измеряемый сигнал, получается, сдвинут в положительную плоскость на половину величины опорного напряжения. Так как, в используемом АЦП опорное напряжение равно 3.3 В, то измеренный сигнал будет смещен на 1.65 В. Указанное смещение измеряемого сигнала корректируется программно и с помощью коэффициентов трансформации датчиков тока и напряжения, а также измерительных трансформаторов преобразовывается к фактическим значениям контролируемого сигнала.

Структурная схема блока формирования комплексных значений сигнала приведена на рисунке 5.11.

Сигналы со временем запаздывания на один или более шагов  $h$  обозначены через  $Z$  в соответствующей отрицательной степени. В первом сумматоре производится усреднение по пяти дискретным значениям, поступающим с шагом  $h=0.001$  ссекунды. Значение коэффициента усреднения  $A$  при этом, согласно [99], равно 3.5204. Производная входного сигнала определяется во втором сумматоре по трем значениям усредненных сигналов, а мгновенное значение амплитуды находим как корень квадратный из суммы квадратов производной входного сигнала и усредненного значения входного сигнала для одного и того же момента времени.

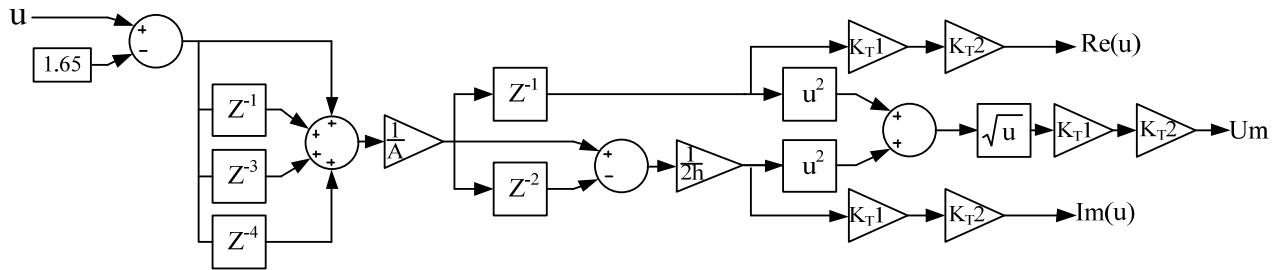


Рисунок 5.11 – Структурная схема блока определения мгновенных комплексных значений входного сигнала

Поскольку в цепи измерительных датчиков тока и напряжения возникают помехи, которые могут обрабатываться устройством БАВР даже в отсутствии измерений, то для этой цели предусмотрен алгоритм, который при отсутствии входных измеряемых сигналов не пропускает сигнал помехи к другим блокам, входящим в состав разработанного устройства БАВР.

### 5.2.3 Пороговые органы тока и напряжения

Пороговые органы тока и напряжения в разработанном устройстве БАВР необходимы для обеспечения его надежной и правильной работы. Так, например, пороговые органы тока используются в алгоритме быстрого и синфазного переключения для правильного определения секции, потерявшей питание. Структурная схема порогового органа тока показана на рисунке 5.12.

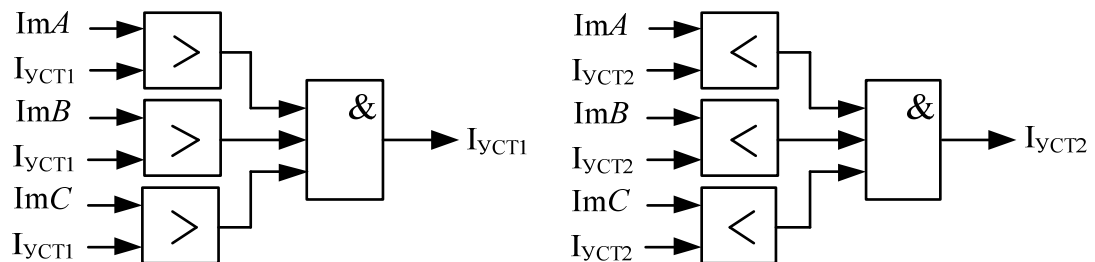


Рисунок 5.12 – Структурная схема порогового органа тока

Пороговый орган тока в режиме реального времени сравнивает значения амплитуды измеряемого сигнала с заданной уставкой по току  $I_{уст}$ . В случае превышения уставки по току  $I_{уст}$  измеряемыми амплитудами во всех трех фазах формируется сигнал  $I_{уст1}$ , соответствующий логической единице. Если значения

амплитуд во всех трех фазах меньше заданной уставки по току  $I_{уст}$ , то формируется сигнал  $I_{уст2}$ , равный логической единице.

Пороговые органы напряжения необходимы для контроля номинального уровня напряжения на резервной секции, так как переключение двигателей на резервную секцию, напряжение которой ниже номинального уровня, может не только привести к срыву самозапуска двигателей потерявших питание, но и выходу из синхронизма синхронных двигателей, подключенных к резервной секции. Также контроль уровня напряжения на секции необходим для реализации алгоритма переключения на резервный источник по остаточному напряжению.

Структурная схема порогового органа напряжения приведена на рисунке 5.13.

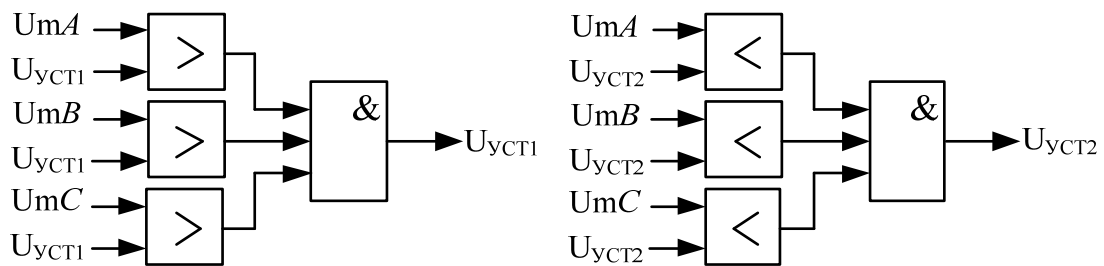


Рисунок 5.13 – Структурная схема порогового органа напряжения

Пороговый орган напряжения включает в себя сравнения амплитуд измеряемых напряжений с двумя уставками по напряжению  $U_{уст1}$  и  $U_{уст2}$ . Уставка по напряжению  $U_{уст1}$  соответствует значению напряжения на секции, при котором допустимо ее использование в качестве резервного источника питания. Если амплитуды измеряемых напряжений превышают значение уставки по напряжению  $U_{уст1}$ , то на выходе формируется сигнал  $U_{уст1}$ , который равен логической единице. Уставка по напряжению  $U_{уст2}$  соответствует уставке при значениях амплитуд напряжений ниже которой допускается переключение на резервный источник по остаточному напряжению. Если амплитуды измеряемых напряжений становятся меньше уставки по напряжению  $U_{уст2}$ , то на выходе формируется сигнал  $U_{уст2}$  значение которого равно логической единице.



#### 5.2.4 Блок направленного реле устройства БАВР

Блок направленного реле разработанного устройства БАВР предназначен для выявления аварийных режимов во внешней сети электроснабжения и состоит из двух блоков для определения комплексных составляющих прямой последовательности тока и напряжения, органа направления мощности смешанного типа и блока логической обработки выходного сигнала от блока направления мощности.

Структурная схема блока определения комплексных составляющих тока прямой последовательности на вводе секции приведена на рисунке 5.14.

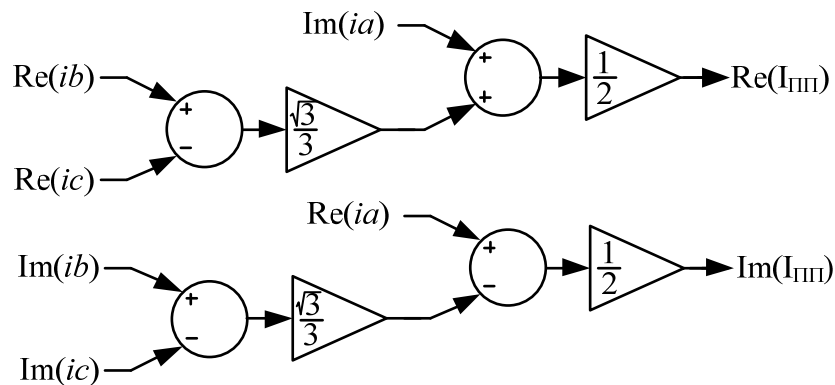


Рисунок 5.14 – Структурная схема блока определения комплексных составляющих тока прямой последовательности на вводе секции

Структурная схема определения комплексных составляющих напряжения прямой последовательности на секции аналогична схеме определения комплексных составляющих тока прямой последовательности, показанной на рисунке 5.14.

Работа блока направленного реле заключается в том, что в режиме реального времени с помощью органа направления мощности на вводе секции определяется направление мощности прямой последовательности и сравнивается с  $P_{уст1}$ . Если направление мощности прямой последовательности на вводе секции изменяет свой знак, то на выходе блока направленного реле появляется сигнал

$P_{уст1}$  сш I, равный единице, что свидетельствует о появлении аварийного режима во внешней сети электроснабжения.

Орган направления мощности в разработанном устройстве БАВР выполнен по смешанному типу и определяет направление мощности на основе комплексных составляющих тока и напряжения прямой последовательности. Структурная схема органа направления мощности прямой последовательности приведена на рисунке 5.15.

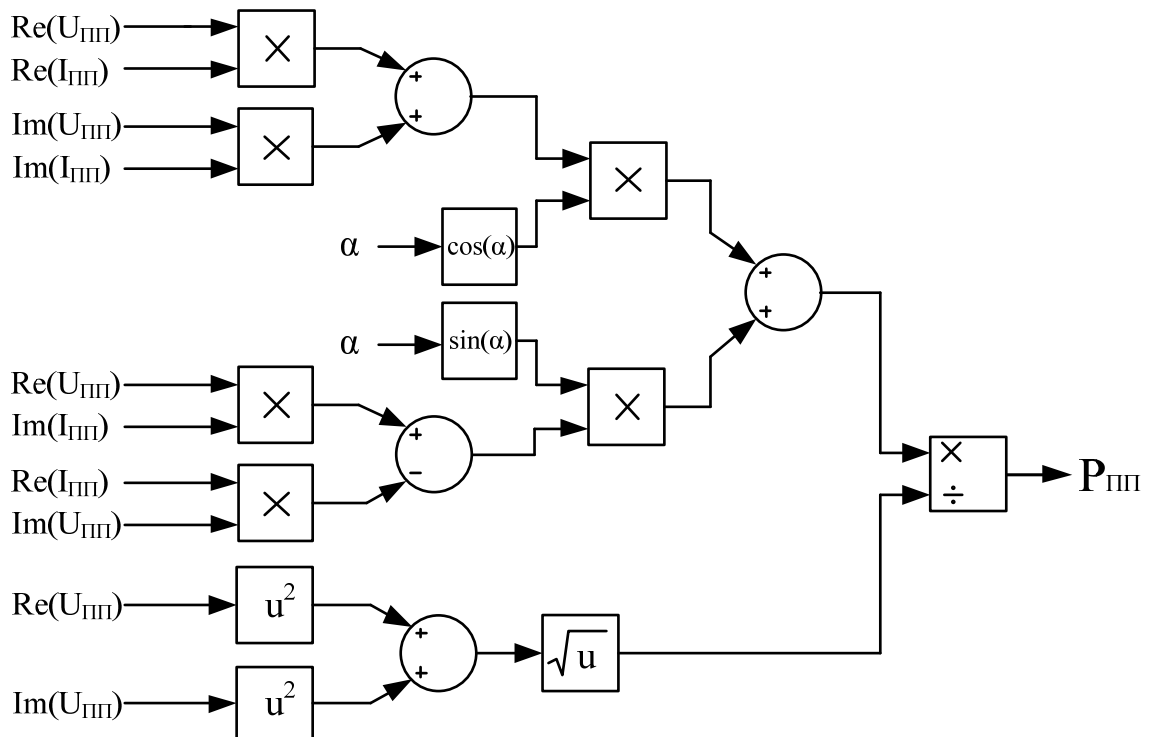


Рисунок 5.15 – Структурная схема органа направления мощности прямой последовательности

На рисунке 5.16 приведена векторная диаграмма органа направления мощности прямой последовательности.

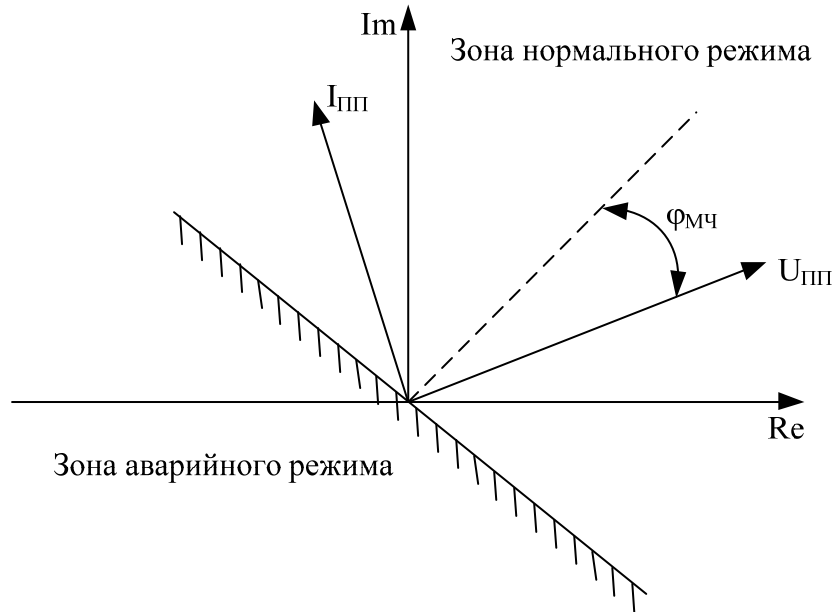


Рисунок 5.16 – Векторная диаграмма органа направления мощности прямой последовательности

В нормальном режиме работы или при коротких замыканиях на секции вектор тока находится в области нормального режима, и направление мощности прямой последовательности считается положительным. При возникновении коротких замыканий в цепи внешнего электроснабжения вектор тока прямой последовательности попадает в зону аварийного режима и значение мощности прямой последовательности на вводе секции становится отрицательным, что свидетельствует о появлении аварийного режима.

#### 5.2.5 Орган контроля косинуса угла между секциями и определение момента синхронной подачи резервного питания

Как следует из анализа, проведенного в первом разделе, в современных устройствах БАВР должны быть предусмотрены несколько режимов переключения на резервный источник питания, а именно: режим быстрого переключения (при угловом сдвиге между векторами напряжений менее  $60^\circ$ ), режим переключения при первом совпадении фаз (синфазное переключение при угле сдвига  $360 \pm 10^\circ$ ), режим переключения по остаточному напряжению, не

превышающему 0.5 номинального и режим переключения с выдержкой времени [100 - 103].

Для реализации приведенных быстрого и синфазного переключения в разработанном устройстве БАВР выполняется контроль косинуса угла между векторами напряжений секций основного и резервного источников питания. Определение косинуса угла между векторами напряжений с целью уменьшения влияния помех выполняется на основе реальных и мнимых частей напряжений обеих секций по формуле:

$$\cos(\varphi_u) = \frac{0,5 \cdot (u_{xa1} \cdot u_{xa2} + u_{xb1} \cdot u_{xb2} + u_{xc1} \cdot u_{xc2})}{\sqrt{(u_{xa1}^2 + u_{xb1}^2 + u_{xc1}^2) \cdot (u_{xa2}^2 + u_{xb2}^2 + u_{xc2}^2)}} + \frac{0,5 \cdot (u_{ya1} \cdot u_{ya2} + u_{yb1} \cdot u_{yb2} + u_{yc1} \cdot u_{yc2})}{\sqrt{(u_{ya1}^2 + u_{yb1}^2 + u_{yc1}^2) \cdot (u_{ya2}^2 + u_{yb2}^2 + u_{yc2}^2)}} \quad (5.1)$$

Структурная схема блока определения косинуса угла между векторами напряжений приведена на рисунке 5.17.

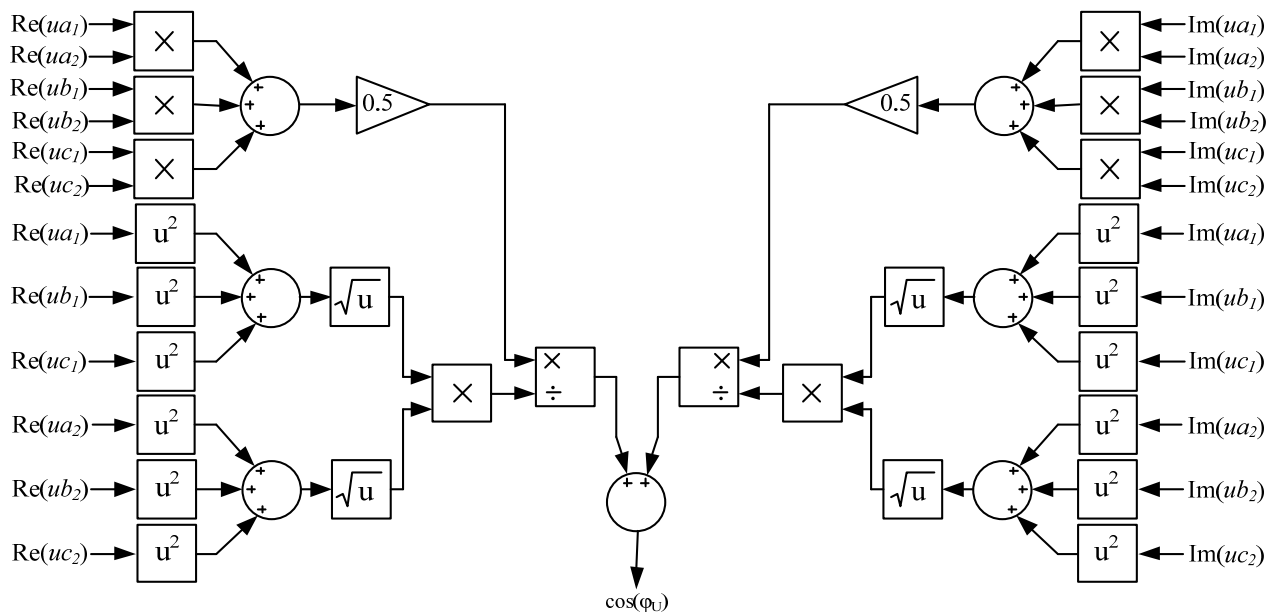


Рисунок 5.17 – Структурная схема блока определения косинуса угла между напряжениями секций

Для удобства в разработанном устройстве БАВР предусмотрен вывод значений косинуса угла между векторами напряжений в радианах или значений угла в градусах.

### 5.2.6 Блок логической обработки сигналов

Блок логической обработки сигналов в разработанном устройстве БАВР необходим для обеспечения правильной и надежной работы всего устройства в различных аварийных режимах и управления вводными выключателями двух секций и секционным выключателем. Структурная схема блока логической обработки сигналов показана на рисунке 5.18.

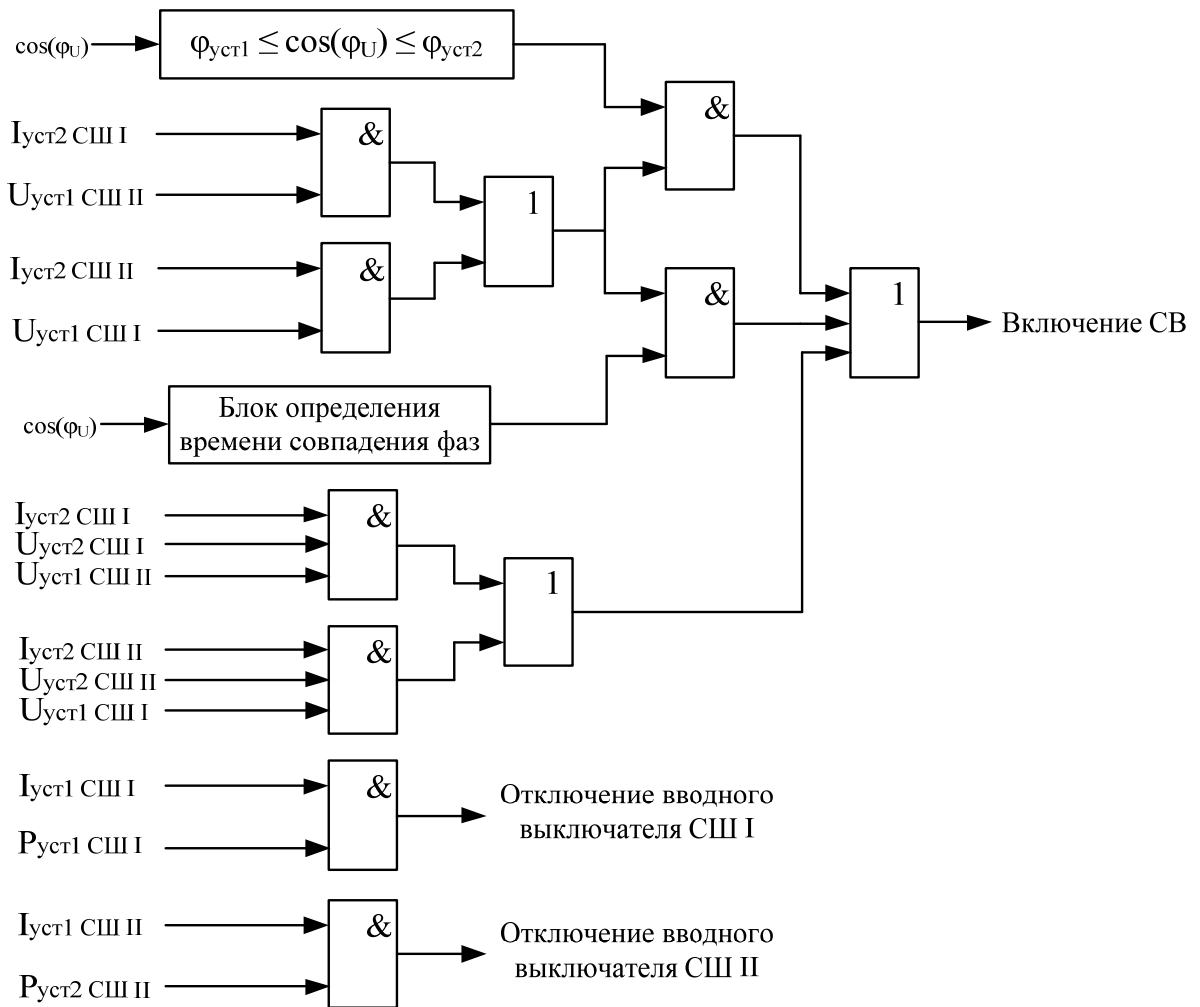


Рисунок 5.18 – Структурная схема блока логической обработки сигналов

Блок логической обработки сигналов постоянно контролирует сигналы от других блоков, входящих в структурную схему устройства БАВР (Рисунок 5.2). Так, например, при возникновении короткого замыкания во внешней сети электроснабжения первой секции шин срабатывает направленное реле, и на вход логического блока «И» поступает сигнал  $P_{уст1} \text{ СШ I}$ , который равен единице,

одновременно с ним от порогового органа тока первой секции шин на вход того же логического блока «И» поступает сигнал  $I_{уст1 \text{ СШ I}}$  значение которого также равно единице, поскольку величина тока на вводе секции больше установленной уставки. В результате работы блока логической обработки «И» формируется сигнал, который дает команду на отключение вводного выключателя первой секции. Аналогичным образом в другом логическом блоке «И» происходит обработка сигналов  $P_{уст2 \text{ СШ II}}$  и  $I_{уст2 \text{ СШ II}}$ , поступающих от органа направления мощности и порогового органа тока второй секции, на выходе которого также формируется сигнал на отключение вводного выключателя второй секции шин, в случае возникновения короткого замыкания во внешней сети электроснабжения второй секции шин.

В случае потери питания по причине не связанной с короткими замыканиями или после отключения вводного выключателя в результате работы органа направления мощности устройства БАВР одновременно запускаются три алгоритма переключения на резервный источник питания.

Работа алгоритма быстрого переключения заключается в следующем. Блок логической обработки входных сигналов постоянно контролирует величину косинуса между векторами напряжений основного и резервного источников питания и в случае если угол начинает меняться и находится в пределах, допускающих быстрое переключение, на выходе блока контроля величины угла появляется сигнал, равный единице, который поступает в логический блок «И». В этот же логический блок «И» поступает сигнал от работы логического блока «ИЛИ». Так, например, при потере питания первой секцией шин в данном режиме переключения происходит проверка уровня напряжения на резервной секции питания, т.е. сигнал от порогового органа напряжения второй секции  $U_{уст1 \text{ СШ II}}$  должен быть равным единице, а также проверяется отсутствие тока на вводе первой секции с помощью порогового органа тока, выходной сигнал которого  $I_{уст2 \text{ СШ I}}$  также будет равен единице. Сигналы от пороговых органов тока  $I_{уст2 \text{ СШ I}}$  и напряжения  $U_{уст1 \text{ СШ II}}$  поступают в логический блок «И»

выходной сигнал, которого поступает в логический блок «ИЛИ». Аналогичным образом организована работа алгоритма быстрого переключения при потере питания второй секцией шин с тем отличием, что в логический блок «ИЛИ» поступает сигнал от другого логического блока «И», который обрабатывает сигналы от порогового органа тока второй секции  $I_{уст2} \text{ СШ II}$  и порогового органа напряжения первой секции  $U_{уст1} \text{ СШ I}$ .

При работе алгоритма синфазного переключения определение секции, потерявшей питание, и наличие необходимого уровня напряжения на резервной секции шин для переключения питания осуществляется также как и при работе алгоритма быстрого переключения питания. Помимо контроля косинуса угла между векторами напряжений основной и резервной секций данный алгоритм при изменении косинуса угла определяет момент совпадения по фазе остаточного напряжения на секции, потерявшей питание, и напряжения резервной секции питания. Определение момента совпадения напряжений по фазе и корректировка времени подачи команды на включение секционного выключателя с учетом его времени включения осуществляется в блоке определения момента совпадения фаз, структурная схема которого приведена на рисунке 5.19.

В том случае, когда не происходит переключения питания на резервный источник по алгоритмам быстрого и синфазного переключения запускается алгоритм переключения по остаточному напряжению. Например, при потере питания первой секцией сигнал от порогового органа тока  $I_{уст2} \text{ СШ I}$  становится равным единице, свидетельствуя об отсутствии тока на вводе первой секции шин, и подается на вход логического блока «И». Затем при снижении уровня напряжения на секции, потерявшей питание, ниже установленной уставки  $U_{уст2}$ , выходной сигнал порогового органа напряжения  $U_{уст2} \text{ СШ I}$  становится равным единице и поступает в тот же логический блок «И». Для проверки достаточного уровня напряжения на резервной секции используется пороговый орган напряжения второй секции, выходной сигнал которого  $U_{уст1} \text{ СШ II}$  будет равен единице в случае достаточного уровня напряжения на резервной секции для

переключения и будет поступать в логический блок «И». В том случае, если все три входных сигнала логического блока «И» будут равны единице, то на выходе логического блока «И» сформируется сигнал на включение секционного выключателя.

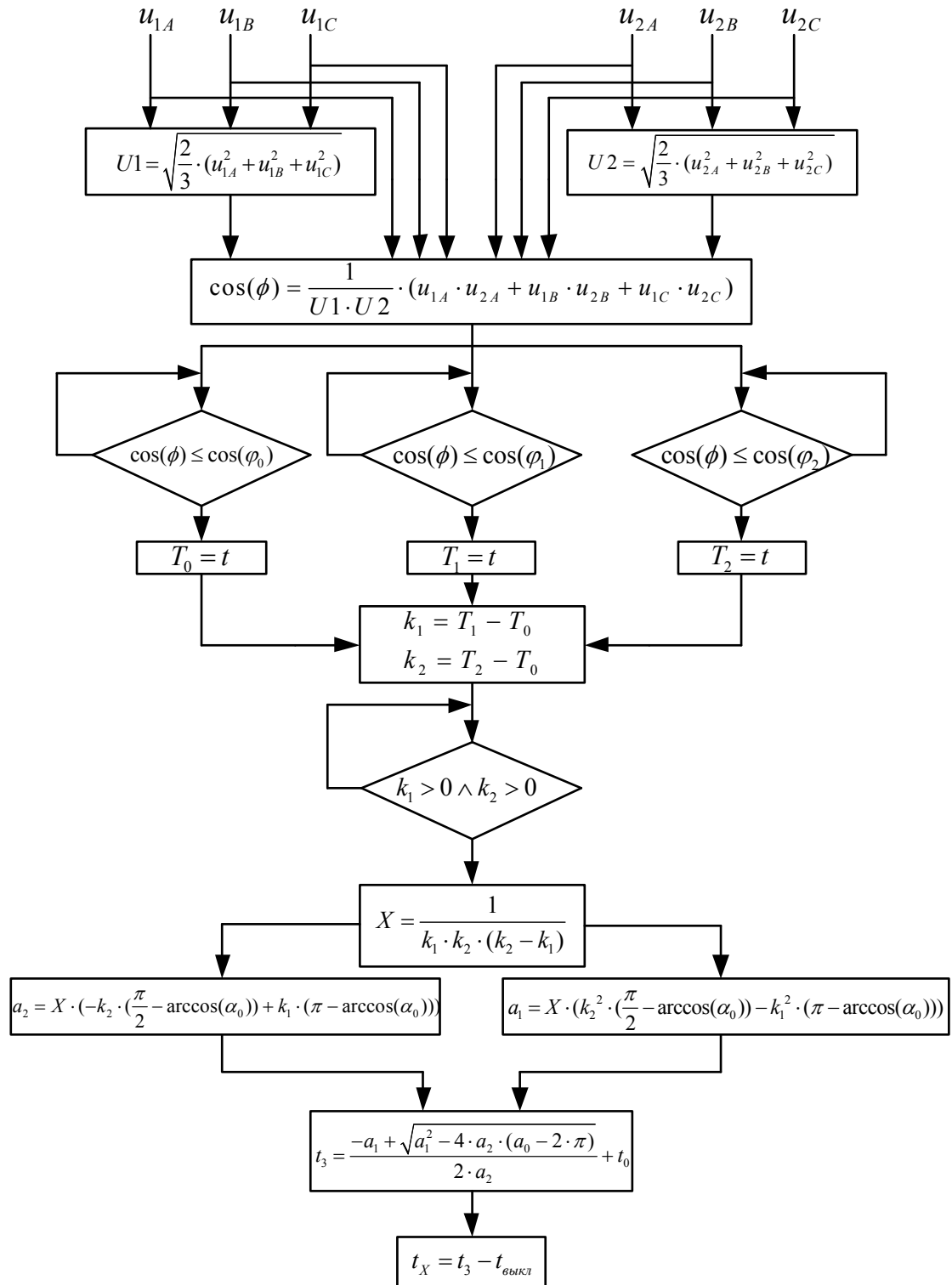


Рисунок 5.19 – Структурная схема блока определения момента совпадения фаз



### 5.2.7 Блок выходных реле

Для осуществления управления вводными и секционным выключателями в разработанном устройстве БАВР используются электромагнитные реле типа LEG-5 [104]. Данные реле имеют катушку электромагнита с номинальным напряжением 5 В и коммутационную способность 10 А при 240 В переменного напряжения. Эти реле имеют по две группы контактов: нормально замкнутые и нормально разомкнутые контакты. Для управления одним выключателем предусмотрено два электромагнитных реле, одно подает команду на включение выключателя, а второе на отключение.

Управление электромагнитными реле осуществляется по дискретным выводам микроконтроллера STM32F4. Однако величины импульса от дискретных каналов микроконтроллера не достаточно для срабатывания реле. Поэтому в разработанном устройстве БАВР для сопряжения дискретных выходов микроконтроллера с электромагнитными реле и управления ими используется микросхема типа ULN2003. Она является набором мощных составных ключей и используется для управления нагрузкой значительной мощности. Ее схема электропитания приведена на рисунке 5.20, а схема подключения микросхемы к выходным электромагнитным реле приведена на рисунке 5.21.

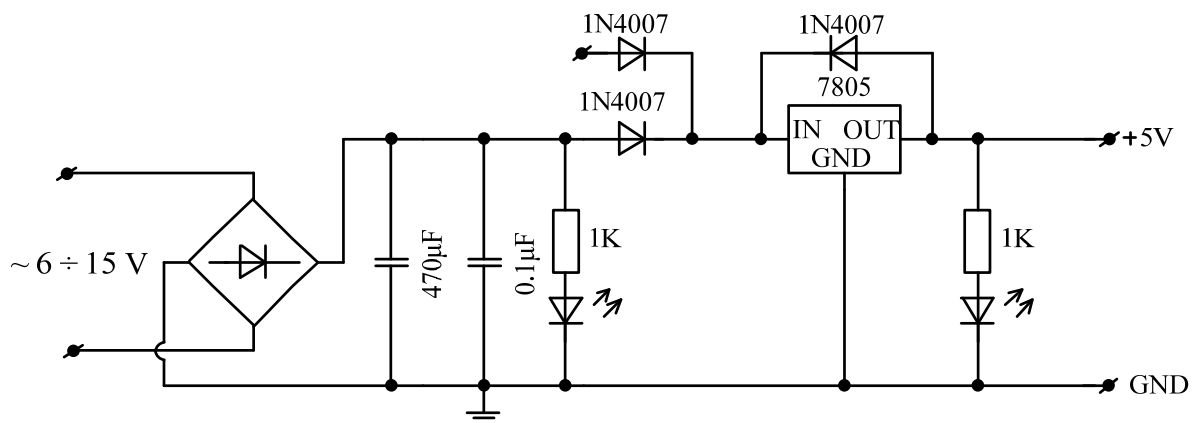


Рисунок 5.20 – Схема питания микросхемы ULN2003

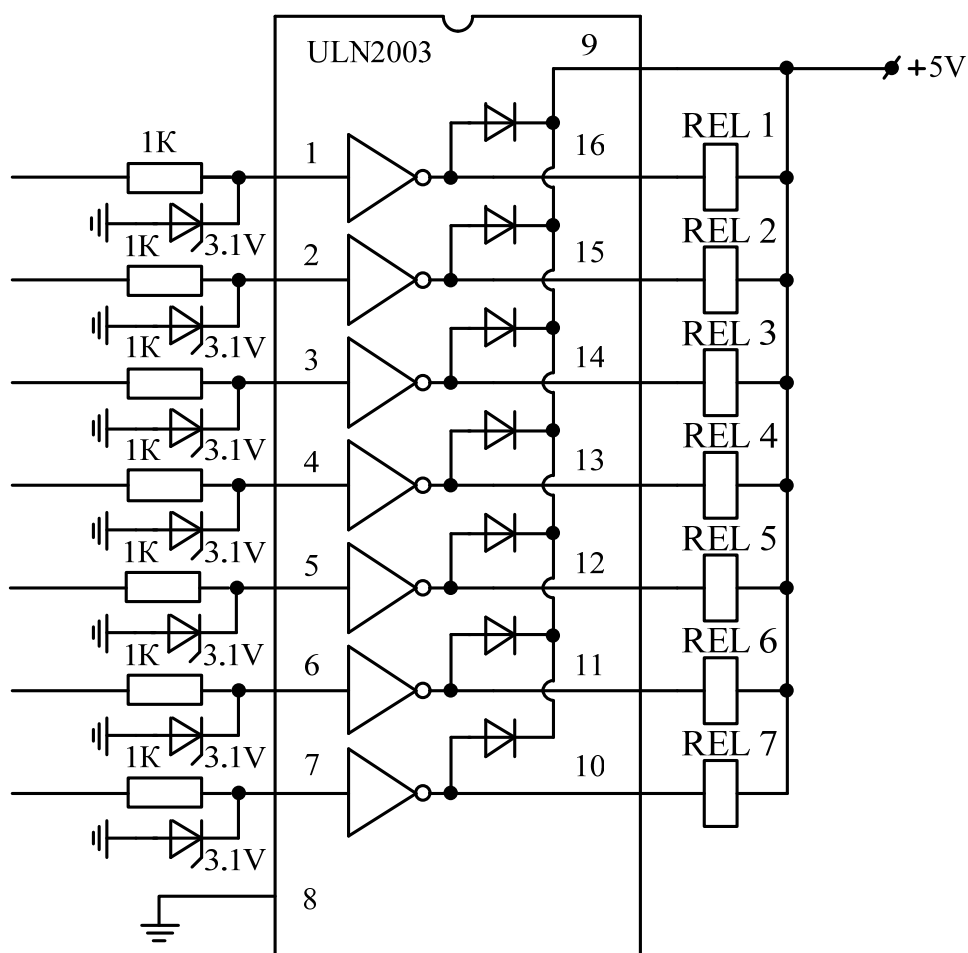


Рисунок 5.21 – Схема подключения микросхемы ULN2003 к выходным электромагнитным реле

### 5.3 Экспериментальное исследование работы устройства БАВР в аварийных режимах

Рассмотрим результаты работы опытного образца разработанного микропроцессорного устройства БАВР в режимах потери питания от основного источника питания и при различных видах коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения.

#### 5.3.1 Разработка программы и методики экспериментальных исследований

Для проверки опытного образца устройства автоматического управления переключением на резервное питание электродвигателей многомашинного

электромеханического комплекса была разработана программа и методика экспериментального исследования.

Объектом исследования является опытный образец микропроцессорного устройства быстродействующего автоматического включения резервного питания.

Цель испытаний – проверка адекватности результатов математического моделирования и техническая реализация результатов исследования.

В таблице 5.1 представлены показатели программы проведения экспериментальных исследований устройства быстродействующего автоматического включения резерва (Программа).

Таблица 5.1 – Определяемые показатели

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение	Предельное значение	Пункт методики
1	2	3	4	5	6
1	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить переключение на резервный источник питания при отключении вводного выключателя по алгоритму «быстрого» переключения	град.		50	1
2	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить переключение на резервный источник питания при отключении вводного выключателя по алгоритму «синфазного» переключения	град.		360	2
3	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить отключение вводного выключателя секции и переключение на резервный источник питания при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения по алгоритму «быстрого» переключения	град.		50	3

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6
4	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить отключение вводного выключателя секции и переключение на резервный источник питания при возникновении двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения по алгоритму «быстрого» переключения	град.		50	4
5	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить отключение вводного выключателя секции и переключение на резервный источник питания при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения по алгоритму «синхронного» переключения	град.		360	5
6	Разработанное устройство БАВР должно обеспечить отключение вводного выключателя секции и переключение на резервный источник питания при возникновении двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения по алгоритму «синхронного» переключения	град.		360	6

Схема испытательного стенда показана на рисунке 5.1. На рисунке 5.22 показана схема цепей управления испытательным стендом. В приложении Б показан внешний вид испытательного стенда.

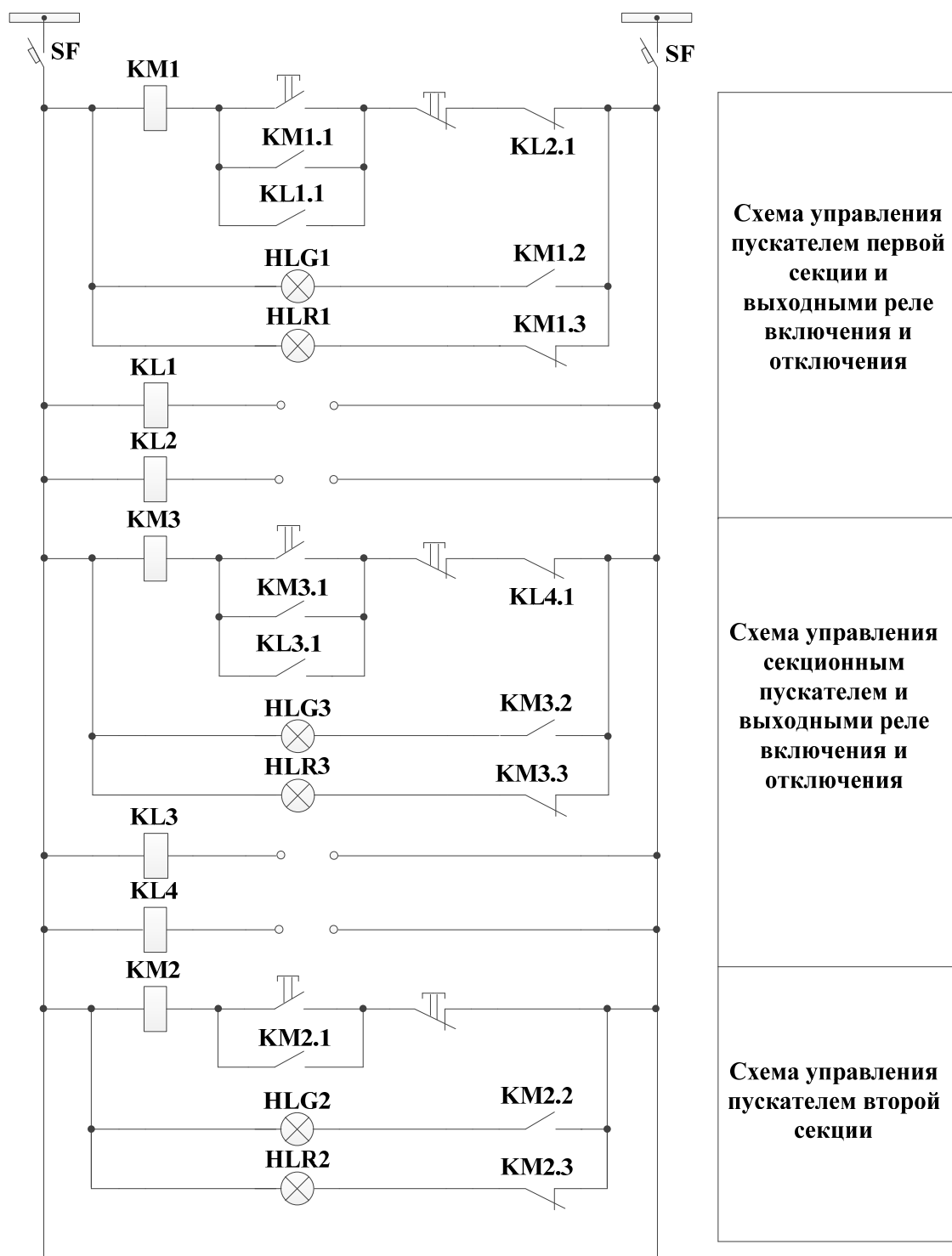


Рисунок 5.22 – Схема цепей управления испытательным стендом

Перечень технических средств необходимых для проведения испытаний приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Перечень технических средств для проведения испытаний

№ п/п	Наименование	Количество
1	Персональный компьютер	1
2	Монитор	1
3	Модуль UART	1

Для проведения испытаний по п.1 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

- 1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);
- 2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;
- 3) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 5.1);
- 4) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 5.1);
- 5) Отключить питание первой секции, путем выключения пускателя КМ1 (Рисунок 1);
- 6) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;
- 7) Зафиксировать время перерыва питания.

Для проведения испытаний по п.2 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

- 1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);
- 2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;
- 3) Отключить программно в устройстве БАВР функцию «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения на резервный источник питания.
- 4) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 5.1);

5) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 5.1);

6) Отключить питание первой секции, путем выключения пускателя КМ1 (Рисунок 1);

7) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;

8) Зафиксировать время перерыва питания.

Для проведения испытаний по п.3 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);

2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;

3) Соединить сопротивления R (Рисунок 5.1) по схеме, моделирующей трехфазное короткое замыкание;

4) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 1);

5) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 5.1);

6) Выполнить имитацию короткого трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения путем включения пускателя КМ3 (Рисунок 5.1);

7) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;

8) Зафиксировать время перерыва питания.

Для проведения испытаний по п.4 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);

2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;

- 3) Соединить сопротивления  $R$  (Рисунок 5.1) по схеме, моделирующей двухфазное короткое замыкание;
- 4) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 1);
- 5) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 5.1);
- 6) Выполнить имитацию короткого трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения путем включения пускателя КМ3 (Рисунок 5.1);
- 7) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;
- 8) Зафиксировать время перерыва питания.

Для проведения испытаний по п.5 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

- 1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);
- 2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;
- 3) Отключить программно в устройстве БАВР функцию «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения на резервный источник питания.
- 4) Соединить сопротивления  $R$  (Рисунок 5.1) по схеме, моделирующей трехфазное короткое замыкание;
- 5) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 1);
- 6) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 5.1);
- 7) Выполнить имитацию короткого трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения путем включения пускателя КМ3 (Рисунок 5.1);
- 8) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;
- 9) Зафиксировать время перерыва питания.



Для проведения испытаний по п.6 Программы испытаний необходимо следовать следующей методики:

- 1) Подключить измерительные цепи устройства БАВР к выходным цепям измерительных трансформаторов тока (ТА1 и ТА2) и напряжения (TV1 и TV2);
- 2) Подключить дискретные выходы устройства БАВР к цепям управления пускателями КМ1 и КМ3;
- 3) Отключить программно в устройстве БАВР функцию «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения на резервный источник питания.
- 4) Соединить сопротивления  $R$  (Рисунок 5.1) по схеме, моделирующей двухфазное короткое замыкание;
- 5) Подать питание на испытательный стенд с помощью автоматов SF1 и SF2 (Рисунок 5.1);
- 6) Подать питание на первую и вторую секции испытательного стенда включением пускателей КМ1 и КМ2 (Рисунок 1);
- 7) Выполнить имитацию короткого трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения путем включения пускателя КМ3 (Рисунок 5.1);
- 8) Зафиксировать угол между напряжениями основного и резервного источников питания в момент включения секционного выключателя;
- 9) Зафиксировать время перерыва питания.

5.3.2 Экспериментальное исследование работы разработанного устройства БАВР в режиме потери питания, вызванного отключением вводного выключателя секции

При экспериментальном исследовании режимов работы разработанного устройства БАВР в качестве коммутационных аппаратов использовались магнитные пускатели, время включения которых составляет 0.022 секунды.

На рисунке 5.23 представлены осциллограммы токов и напряжений основной и резервной секции, величина угла между напряжениями взаиморезервируемых секций, а также диаграмма сигнала на включение

секционного выключателя. Величина уставки по углу для алгоритма быстрого переключения составила диапазон от  $32^{\circ}$  до  $50^{\circ}$ .

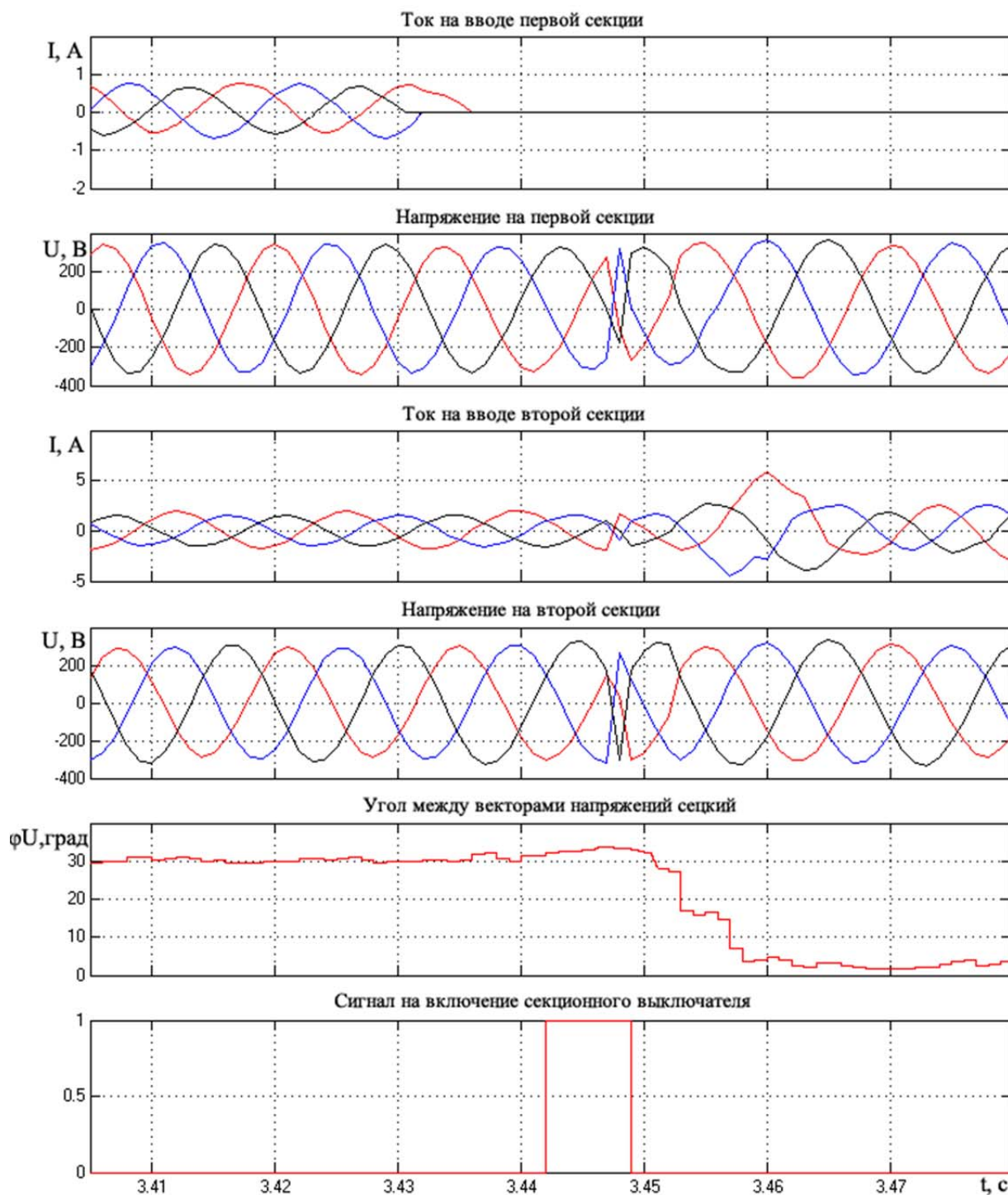


Рисунок 5.23 – Осциллограммы токов на вводе первой и второй секций, напряжений на первой и второй секциях, угол между напряжениями секций и дискретный сигнал устройства БАВР в режиме «быстрого» переключения

Как видно из рисунка 5.23 при потере питания от основного источника питания  $t=3.432$  секунды сигнал на включение секционного выключателя был подан через  $t=0.003$  секунды, Включение секционного выключателя произошло в момент времени  $t=3.432$  секунды, а суммарное время перерыва питания при работе микропроцессорного устройства БАВР составило 0.017 секунды, а уровни токов самозапуска не превысили уровня пусковых токов. Угол включения равен  $33^{\circ}$  Команда на включение секционного выключателя была подана при превышении углом между векторами напряжений взаиморезервируемых секций заданного диапазона уставки.

На рисунке 5.24 показаны осциллограммы токов и напряжений взаиморезервируемых секций и угла между напряжениями секций при работе устройства микропроцессорного БАВР в режиме синхронного переключения на резервный источник питания.

По результатам работы устройства микропроцессорного БАВР в режиме синхронного переключения (Рисунок 5.24) видно, что в момент времени  $t=21.95$  секунды произошло отключение вводного выключателя, команда на включение секционного выключателя была подана, исходя из прогнозирования времени совпадения напряжений основной и резервной секций и времени включения секционного выключателя, включение секционного выключателя произошло в момент времени  $t=23.333$  секунды. Суммарное время перерыва питания при работе алгоритма синхронного переключения микропроцессорного устройства БАВР составило 0.383 секунды, а угол включения был равен  $350^{\circ}$ . Из рисунка 5.24 видно, что в режиме самозапуска уровень токов двигателей не превысил уровня пусковых токов.

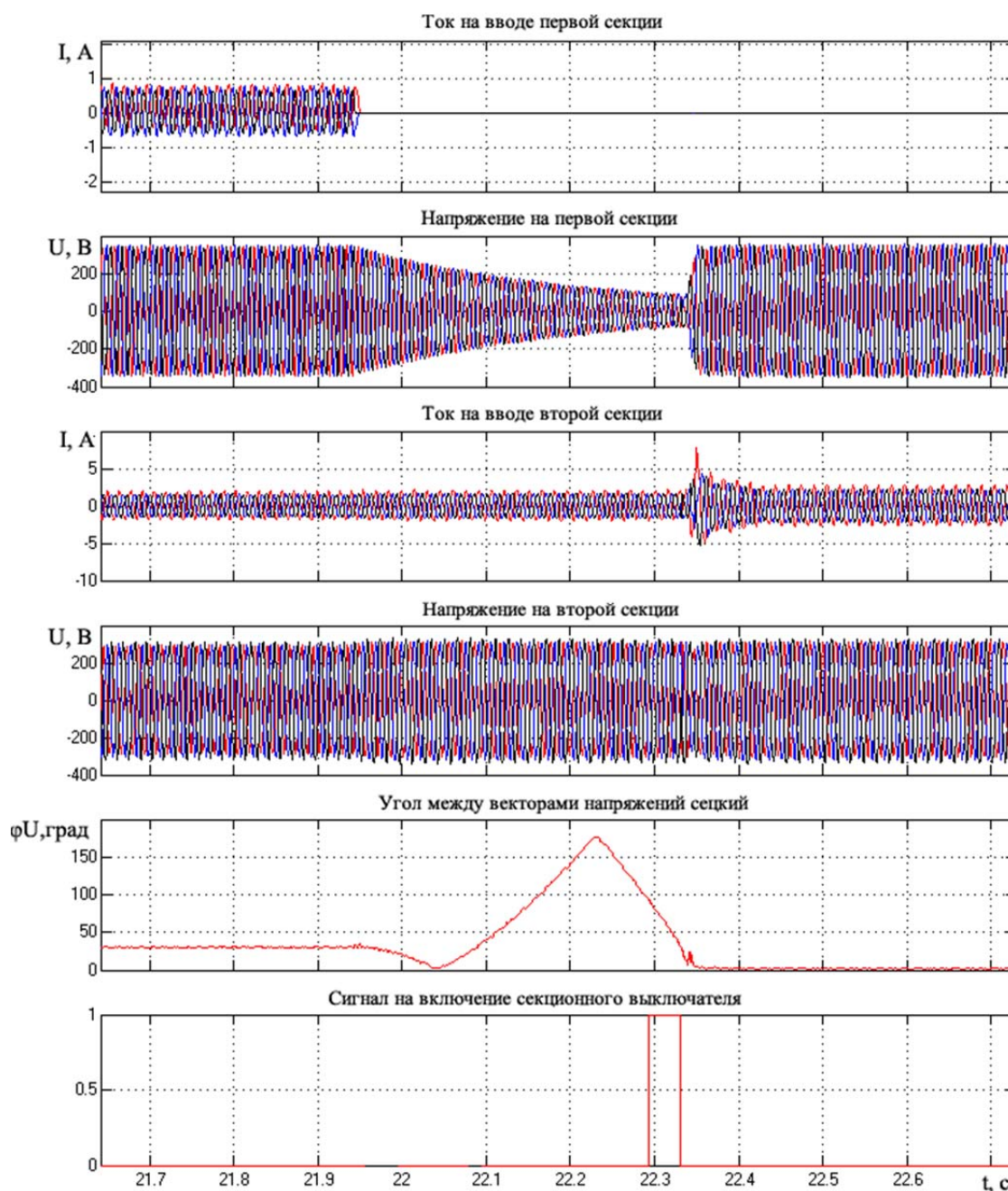


Рисунок 5.24 – Осциллограммы токов на вводе первой и второй секций, напряжений на первой и второй секциях, угол между напряжениями секций и дискретный сигнал устройства БАВР в режиме «синфазного» переключения

### 5.3.3 Экспериментальное исследование работы разработанного устройства БАВР в режимах коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения

В качестве пускового органа устройства микропроцессорного БАВР, реагирующего на появление коротких замыканий в питающей сети используется

орган направления мощности, усовершенствованный алгоритм работы которого приведен в разделе 3.

На рисунке 5.25 приведены осциллограммы токов и напряжений основной секции, а также осциллограмма усовершенствованного органа направления мощности и диаграмма сигнала на отключение вводного выключателя секции.

Из рисунка 5.25 видно, что при появлении короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения усовершенствованный орган направления мощности микропроцессорного устройства БАВР дает сигнал на отключение вводного выключателя секции уже через 0.003 сек. Угол максимальной чувствительности в усовершенствованном органе направления мощности установлен  $90^0$ .

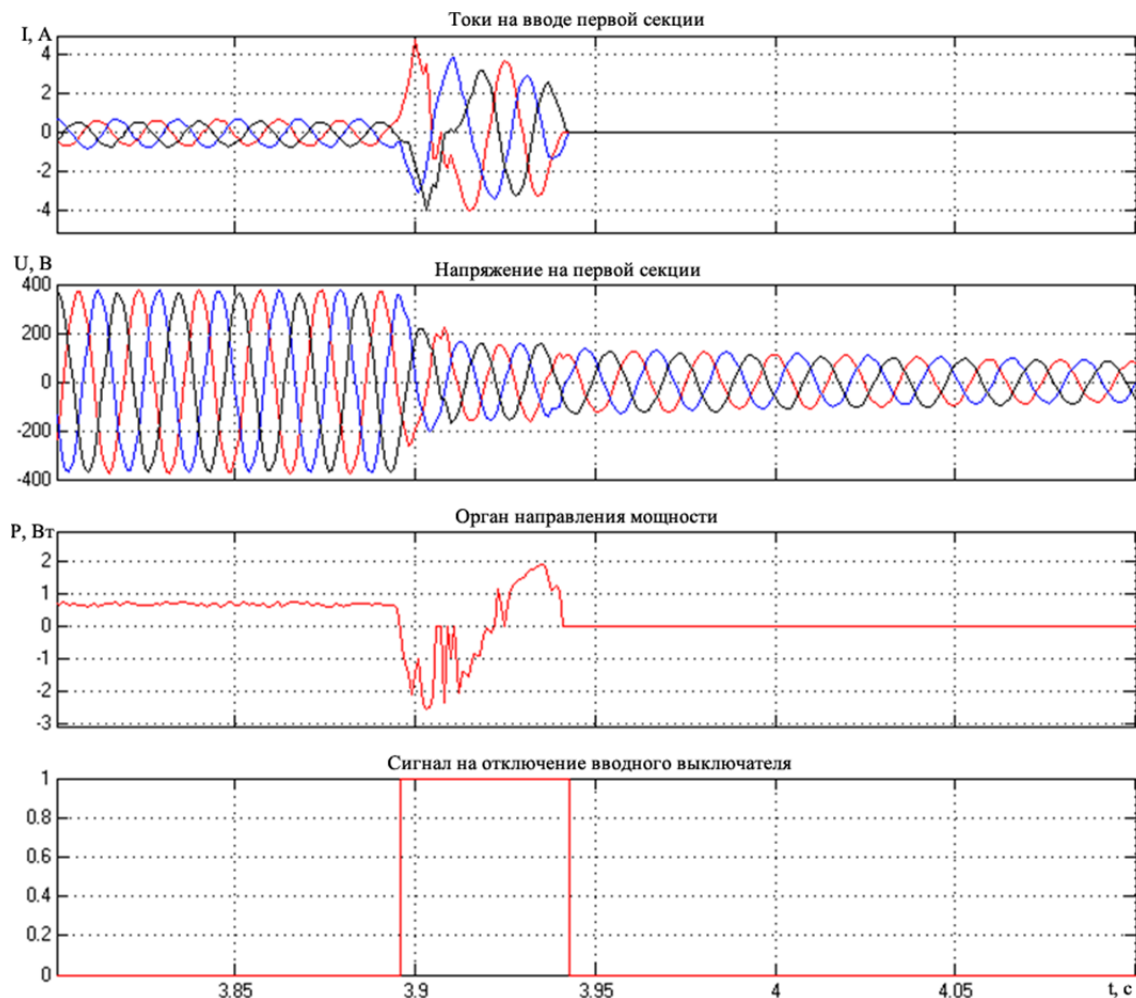


Рисунок 5.25 – Осциллограммы токов на вводе секции, напряжения на секции и диаграммы органа направления мощности и сигнала на отключение вводного выключателя секции при внешнем коротком замыкании



На рисунке 5.26 показаны осциллограммы пускового режима двигательной нагрузки, питающейся от основной секции. На рисунке 5.25 также представлена осциллограмма усовершенствованного органа направления мощности микропроцессорного устройства БАВР. Из рисунка 5.25 видно, что усовершенствованный орган направления мощности не срабатывает в пусковых режимах двигательной нагрузки, что обеспечивает селективную работу микропроцессорного устройства БАВР и исключает его ложную работу в пусковых режимах.

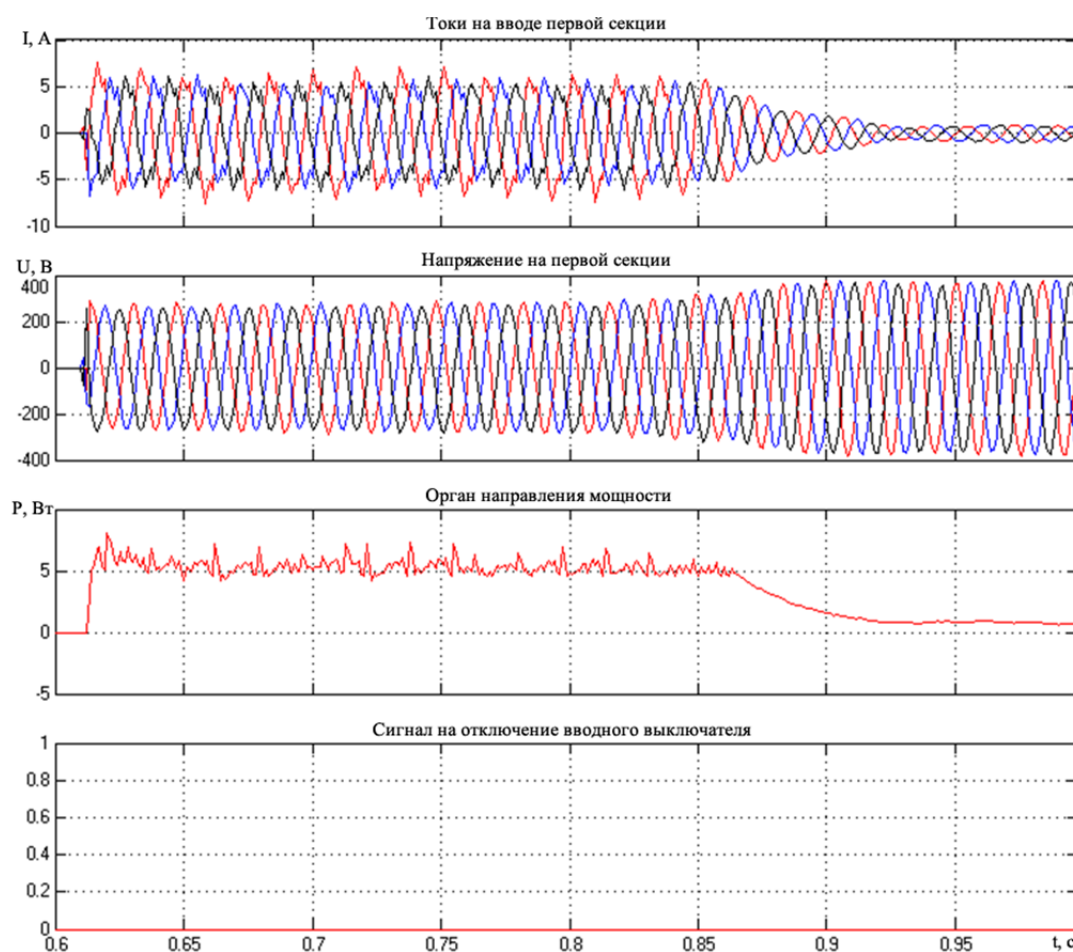


Рисунок 5.26 – Осциллограммы токов на вводе секции, напряжения на секции и диаграммы органа направления мощности и сигнала на отключение вводного выключателя секции в режиме пуска электродвигателей АИР100L8 и АИР63В2

На рисунке 5.27 приведены осциллограммы токов и напряжений основной и резервной секций, осциллограмма угла между векторами напряжений взаиморезервируемых секций, осциллограмма работы усовершенствованного

органа направления мощности, а также диаграммы сигналов на отключение вводного выключателя секции и включение секционного выключателя при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения.

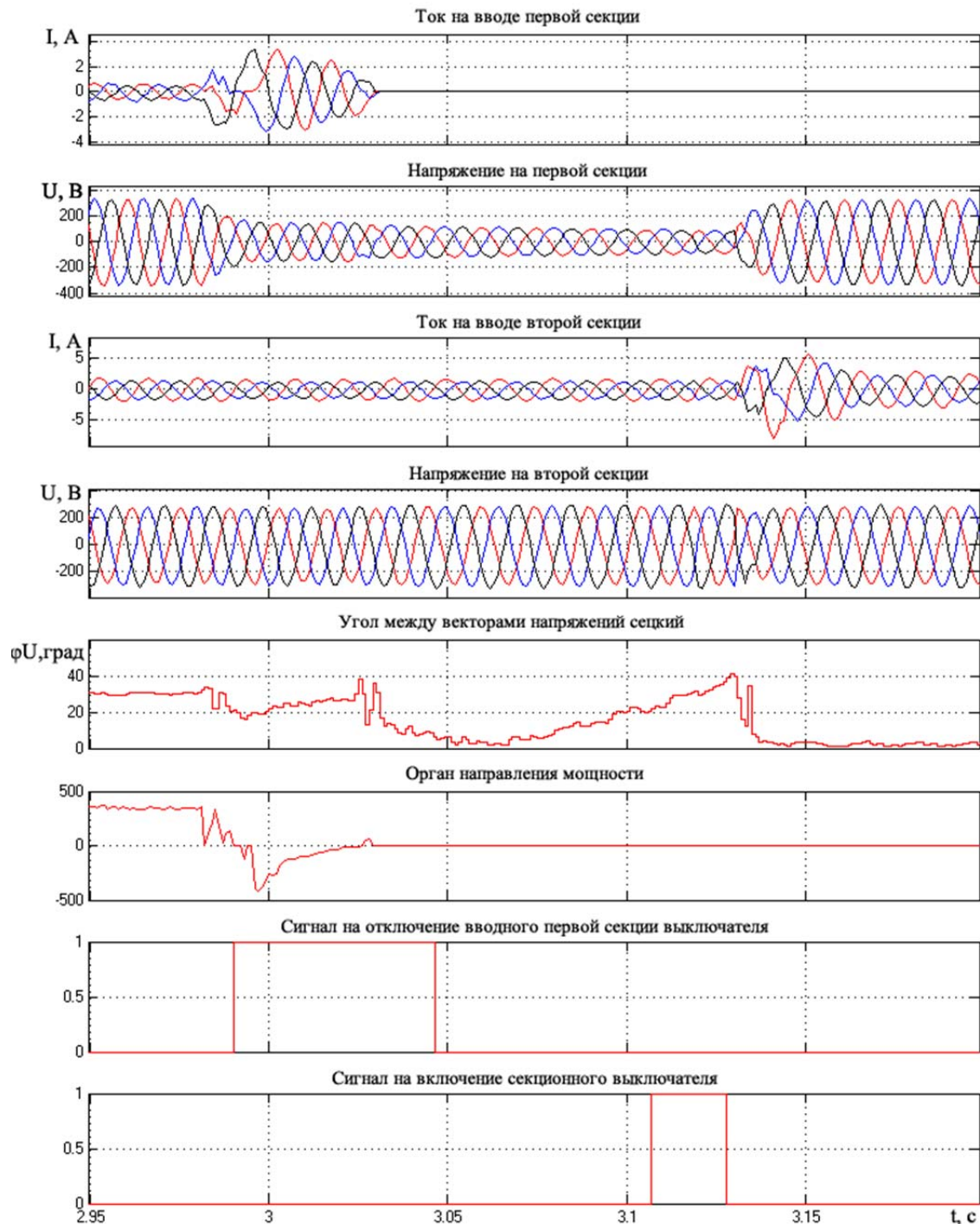


Рисунок 5.27 – Осциллограммы токов на вводе секций, напряжения на секциях, диаграммы пусковых органов устройства БАПР при внешнем трехфазном коротком замыкании и «быстром» переключении на резервный источник питания

Из рисунка 5.27 видно, что при возникновении трехфазного короткого замыкания в питающей сети в момент времени  $t=2.987$  секунды время реакции органа направления мощности микропроцессорного устройства БАВР составило 0.003 секунды, после чего была дана команда на отключение вводного выключателя секции. После отключения вводного выключателя сработал алгоритм быстрого переключения на резервный источник питания, и при превышении углом между напряжениями секций основного и резервного источника питания нижнего порогового значения уставки была дана команда на включение секционного выключателя. Секционный выключатель включился в момент времени  $t=3.128$ . Суммарное время на определение появления аварийного режима и цикла переключения на резервный источник питания составило 0.138 секунды, угол включения составил  $40^0$ , а уровень токов самозапуска не превысил уровня пусковых токов.

На рисунке 5.28 показаны осциллограммы работы усовершенствованного устройства микропроцессорного БАВР в режиме внешнего двухфазного короткого замыкания. На рисунке 5.28 показаны осциллограммы токов и напряжений обеих секций, осциллограмма усовершенствованного органа направления мощности, угла между векторами напряжений взаиморезервируемых секций и диаграммы сигналов на отключение вводного и включение секционного выключателей.

Как следует из рисунка 5.28, в момент времени  $t=5.855$  секунды возникло двухфазное короткое замыкание в сети внешнего электроснабжения, а время реакции пускового органа направления мощности на появление аварийного режима составило 0,003 секунды. Переключение на резервный источник питания, так же как и в случае трехфазного короткого замыкания в системе внешнего электроснабжения происходило по алгоритму быстрого переключения. Секционный выключатель включился в момент времени  $t=5.918$ , угол включения равен  $39^0$  а полное время цикла работы микропроцессорного устройства БАВР составило 0.06 секунды.



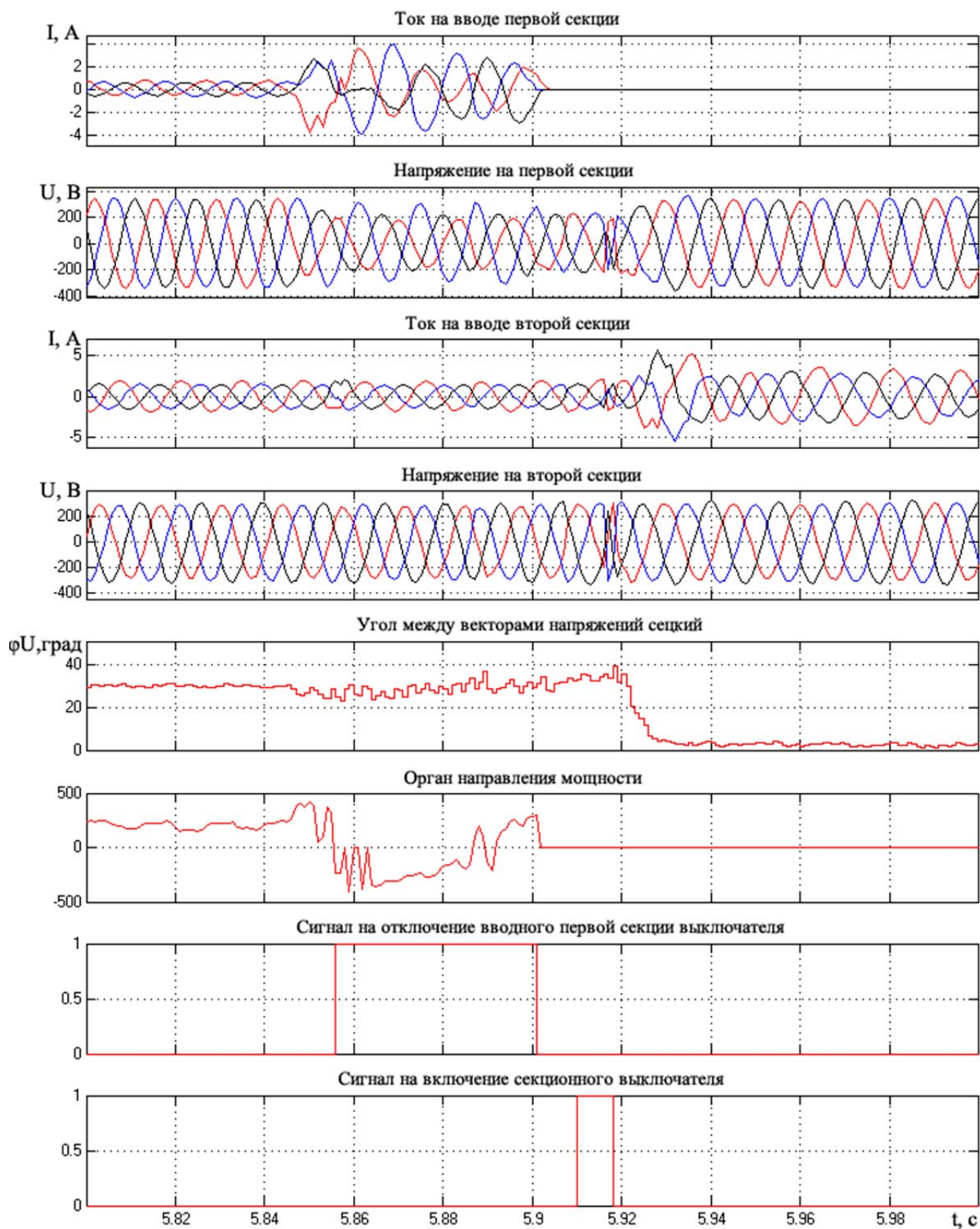


Рисунок 5.28 – Осциллограммы токов на вводе секций, напряжения на секциях, диаграммы пусковых органов устройства БАПР при внешнем двухфазном коротком замыкании и «быстром» переключении на резервный источник питания

В случае невозможности осуществления алгоритма «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения на резервный источник питания в микропроцессорном устройстве БАВР по логической схеме «ИЛИ» запускается алгоритм синхронного переключения на резервный источник питания и включение резервного источника питания происходит в момент времени совпадения по фазе векторов напряжения взаиморезервируемых секций. Осциллограммы «синфазного» переключения на резервный источник питания при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения показаны на рисунке 5.29, а на рисунке 5.30 приведены осциллограммы «синфазного» переключения на резервный источник питания при возникновении двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения.

Из рисунка 5.29 видно, что при возникновении трехфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения в момент времени  $t = 2.511$  секунды время реакции пускового органа направления мощности на появление аварийного режима составило 0.003 секунды, после чего была дана команда на отключение вводного выключателя секции. После отключения вводного выключателя секции запустился алгоритм «синфазного» включения резервного источника питания и в момент времени  $t = 2.958$  секунды произошло включение секционного выключателя с величиной угла включения  $342^0$ . Время перерыва питания составило 0.444 секунды.

Из анализа рисунка 5.30 следует, что при возникновении двухфазного короткого замыкания в сети внешнего электроснабжения в момент времени  $t = 3.291$  секунды время реакции пускового органа направления мощности на появление аварийного режима составило 0.003 секунды, после чего была дана команда на отключение вводного выключателя секции. После отключения вводного выключателя секции запустился алгоритм «синфазного» включения резервного источника питания и в момент времени  $t = 3.9$  секунды произошло включение секционного выключателя с величиной угла включения  $345^0$ . Время перерыва питания составило 0.609 секунды.

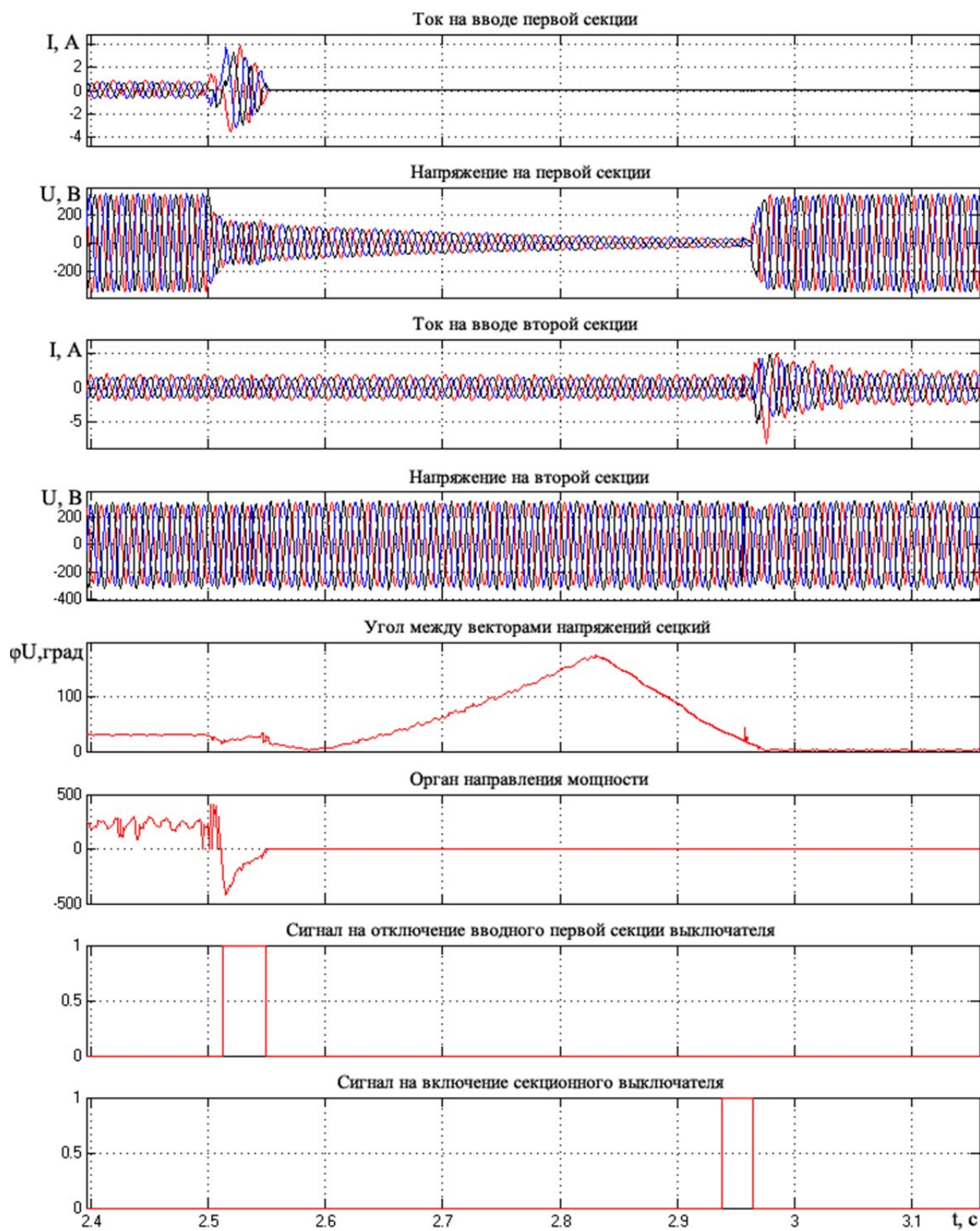


Рисунок 5.29 –Осциллограммы токов на вводе секций, напряжения на секциях, диаграммы пусковых органов устройства БАВР при внешнем трехфазном коротком замыкании и «синфазном» переключении на резервный источник питания



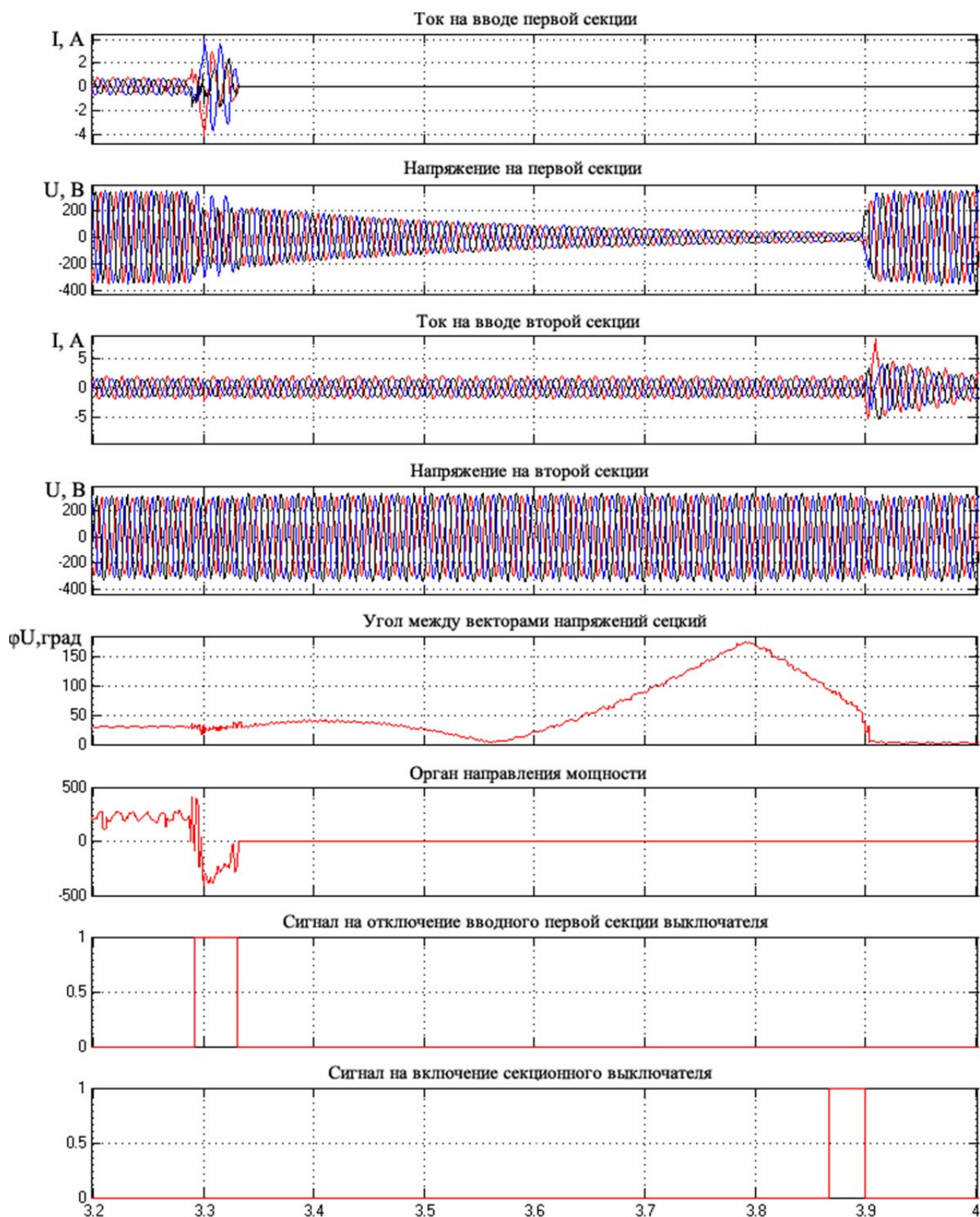


Рисунок 5.30 – Осциллограммы токов на вводе секций, напряжения на секциях, диаграммы пусковых органов устройства БАПР при внешнем двухфазном коротком замыкании и «синфазном» переключении на резервный источник питания

В таблице 5.3 показаны угол включения и время переключения на резервный источник питания двигательной нагрузки в различных режимах.

Таблица 5.3 – Угол включения и время переключения на резервный источник электропитания в различных режимах.

Причина потери питания	Трёхфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	Двухфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	Трёхфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник	Двухфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник	Быстрое переключение на резервный источник при потере питания	Синфазное переключение на резервный источник при потере питания
Время переключения, с	0.138	0.06	0.444	0.609	0.017	0.383
Угол включения, град	40	39	342	345	35	350

Приведенные результаты экспериментальных исследований (Рисунок 5.23 – 5.30) на экспериментальном стенде показывают эффективность работы разработанного устройства быстродействующего автоматического включения резерва и осуществляют подачу резервного питания на секцию, потерявшую питание по причине внешних коротких замыканий или отключения вводного выключателя, с минимально возможным временем перерыва питания и контролем угла рассогласования между напряжениями основного и резервного источников питания.

#### 5.4 Анализ результатов экспериментальных исследований

Поскольку длительность перерыва при нарушении нормального режима электроснабжения находится в зависимости от коэффициента загрузки и момента инерции приводов многомашинного электромеханического комплекса, то для анализа результатов экспериментальных исследований в качестве критерия оценки эффективности работы системы автоматического управления переключением на резервный источник питания примем угол включения (угол между напряжениями секций основного и резервного источников питания в

момент подачи резервного питания), поскольку именно от угла включения зависит уровень токов самозапуска и электромагнитных моментов электродвигателей.

Выполним оценку полученных результатов при переключениях на резервный источник питания, как в аварийных режимах, вызванных короткими замыканиями во внешней сети электроснабжения, так и при отключении вводного выключателя по другим причинам. Полученные результаты экспериментов разделим на две группы.

К первой группе относятся экспериментальные данные, полученные в результате опытов «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения на резервный источник питания, как в режимах потери питания, так и при возникновении трехфазных и двухфазных коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения. Для каждого опыта было выполнено по два замера углов включения, результаты которых приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Величины углов включения резервного источника питания при «быстром» (близкого к мгновенному) переключении.

Причина потери питания	Трехфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник		Двухфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник		«Быстрое» переключение на резервный источник при потере питания	
	Замер 1	Замер 2	Замер 1	Замер 2	Замер 1	Замер 2
Угол включения, град	40	39	39	37	33	38

Поскольку математическое ожидание выступает в качестве наиболее вероятного значения измеряемой величины, то для шести зафиксированных значений угла включения резервного источника питания при «быстром» переключении на резервный источник питания математическое ожидание определяется по формуле:

$$\overline{\varphi U} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi U_i}{n} = \frac{40 + 39 + 39 + 37 + 33 + 38}{6} = 38^0$$

Для определения оценки генерального среднеквадратичного отклонения угла включения резервного источника питания сначала определяется дисперсия выборки по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi U_i - \overline{\varphi U})^2}{n-1} = \frac{(40-38)^2 + (39-38)^2 + (39-38)^2 + (37-38)^2 + (33-38)^2 + (37-38)^2}{6} = 3.2^0$$

Значение  $S_{\varphi U}$  является оценкой среднеквадратической абсолютной ошибки отдельного опыта и определяется по формуле:

$$S_{\varphi U} = M_K \sqrt{S^2} = 1.051 \cdot \sqrt{3.2} = 1.88^0$$

где:  $M_K$  – коэффициент, зависящий от числа степеней свободы, для шести измерений равный 1.051 [105].

Мера точности среднего результата  $S_{\varphi U}$  рассчитывается по формуле:

$$S_{\overline{\varphi U}} = \frac{S_{\varphi U}}{\sqrt{n}} = \frac{1.88}{\sqrt{6}} = 0.768^0$$

Тогда, имея значение точности среднего результата  $S_{\varphi U}$ , доверительный интервал может быть рассчитан следующим образом:

$$t_{\alpha} \cdot S_{\overline{\varphi U}} = 2.571 \cdot 0.768 = 1.97^0$$

где:  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, для шести измерений равный  $t_{\alpha}=1.97$  [105].

В таблице 5.5 – приведены углы включения резервного источника питания при «синфазном» переключении на резервный источник при потере питания и при возникновении трехфазных и двухфазных коротких замыканий.

Таблица 5.5 – Величины углов включения резервного источника питания при «синфазном» переключении.

Причина потери питания	Трехфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник		Двухфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник		«Синфазное» переключение на резервный источник при потере питания	
	Замер 1	Замер 2	Замер 1	Замер 2	Замер 1	Замер 2
Угол включения, град	342	348	345	351	350	355

Величина математического ожидания для шести замеров значений угла включения резервного источника питания при «синфазном» переключении на резервный источник питания составляет:

$$\overline{\varphi U} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi U_i}{n} = \frac{342 + 348 + 345 + 351 + 350 + 355}{6} = 348.5^0$$

Дисперсия выборки для определения оценки генерального среднеквадратичного отклонения угла включения резервного источника питания равна:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi U_i - \overline{\varphi U})^2}{n-1} = \frac{(342 - 348.5)^2 + (348 - 348.5)^2 + (345 - 348.5)^2 + (351 - 348.5)^2 + (350 - 348.5)^2 + (355 - 348.5)^2}{6} = 17.583^0$$

Оценка среднеквадратичной абсолютной ошибки  $S_{\varphi U}$  равна:

$$S_{\varphi U} = M_K \sqrt{S^2} = 1.051 \cdot \sqrt{17.583} = 4.41^0$$

где:  $M_K$  – коэффициент, зависящий от числа степеней свободы, для шести измерений равный 1.051 [105].

Мера точности среднего результата  $S_{\varphi U}$  рассчитывается по формуле:

$$S_{\overline{\varphi U}} = \frac{S_{\varphi U}}{\sqrt{n}} = \frac{4.41}{\sqrt{6}} = 1.8^0$$

Тогда, имея значение точности среднего результата  $S_{\varphi U}$ , доверительный интервал может быть рассчитан следующим образом:

$$t_{\alpha} \cdot S_{\overline{\varphi U}} = 2.571 \cdot 1.8 = 4.63^0$$

где:  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, для шести измерений равный  $t_{\alpha}=1.97$  [105].

Полученные результаты доверительного интервала, который для режима «быстрого» (близкого к мгновенному) переключения составляет  $\pm 1.97^0$ , а для режима «синфазного» переключения –  $\pm 4.63^0$ , позволяют сделать вывод о том, что при нарушении нормального режима электроснабжения, обусловленного отключением секционного выключателя или возникновением коротких



замыканий в сети внешнего электроснабжения, переключение на резервный источник питания произойдет в диапазоне допустимых углов включения резервного источника питания, что обеспечит уровень токов самозапуска электродвигателей не выше уровня пусковых токов.

В таблице 5.6 приведен сравнительный анализ результатов математического моделирования работы усовершенствованного устройства быстродействующего автоматического включения резерва и его экспериментального исследования в режимах нарушения нормального режима электроснабжения электродвигателей многомашинного электромеханического комплекса.

Таблица 5.6 – Сравнительная характеристика результатов математического моделирования и результатов экспериментального исследования

Причина потери питания	Угол включения резервного источника, град		Погрешность, %
	Результат математического моделирования	Результат эксперимента	
Трехфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	40	40	0
Двухфазное КЗ и «быстрое» переключение на резервный источник	36	39	7.6
Трехфазное КЗ и «синфазное» переключение на резервный источник	355	342	3.6
«Быстрое» переключение на резервный источник при потере питания	30	33	9
«Синфазное» переключение на резервный источник при потере питания	358	350	2.2

Из таблицы 5.6 видно, что погрешность результатов теоретических (с помощью математической модели) и экспериментальных исследований не превышает 10% и можно сделать вывод, что результаты, полученные в процессе испытаний опытного образца устройства быстродействующего автоматического включения резерва, в полной мере подтверждают результаты теоретических

исследований, направленных на обеспечение бесперебойного режима электроснабжения электродвигателей многомашинных электромеханических комплексов предприятий с непрерывным технологическим процессом.

### 5.5 Выводы по разделу 5

1. Разработана и обоснована структура микропроцессорного устройства быстродействующего автоматического включения резерва, в котором используется усовершенствованный орган направления мощности и разработанный алгоритм синфазного переключения на резервный источник питания, выполнена его техническая реализация, отличающаяся от известных тем, что позволяет корректно определить нарушение режима электроснабжения, обусловленного короткими замыканиями в сети внешнего электроснабжения или причинами, не связанными с короткими замыканиями и обеспечить подачу резервного питания на двигательную нагрузку с обеспечением допустимых уровней токов и электромагнитных моментов.

2. Разработана и апробирована программа экспериментального исследования опытного образца устройства быстродействующего автоматического включения резерва на испытательном стенде.

3. Экспериментальные исследования на испытательном стенде работы опытного образца устройства микропроцессорного быстродействующего автоматического включения резерва, как в режимах внешних коротких замыканий, так и в режимах потери питания, вызванных отключением вводного выключателя секции и их анализ подтвердили корректность математического описания и структур моделей исследования, обоснованность принятых допущений, что позволило выполнить рациональный подход к построению схемы, расчёту и выбору параметров ее компонентов, обоснованию корректного алгоритма работы технического решения в области автоматизации включения резервного электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования методов и устройств автоматического переключения на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения, позволяющее обеспечить бесперебойное электроснабжения ответственных узлов предприятий с непрерывным технологическим процессом.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы:

1. Для асинхронных и синхронных электродвигателей обоснованы методы определения параметров многоконтурных схем замещения на основе каталожных данных, в которых учитывается влияния скин-эффекта на параметры роторных цепей.

2. Разработана математическая модель многомашинного электромеханического комплекса, адаптированная к исследованию процессов при автоматическом включении резерва электроснабжения. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, записанные в фазных координатах для всех элементов системы, что в отличие от известных моделей позволяет учитывать пофазную несимметрию параметров.

3. Разработан метод определения ортогональных составляющих измеряемых сигналов тока (напряжения), в котором для повышения быстродействия, амплитуду и фазу эквивалентной синусоиды находят путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемых сигналов и их производных, что обеспечивает повышение быстродействия.

4. Усовершенствована модель и структура пускового органа направления мощности, в котором определяют угол сдвига фаз между током и опорным напряжением прямой последовательности, при этом в качестве опорного напряжения используют напряжение на питающих шинах в предыдущем цикле

измерений, что позволяет обеспечить успешную работу устройства БАВР при близких коротких замыканиях и глубоких посадках напряжения.

5. Разработан способ синфазной подачи резервного питания, основанный на контроле мгновенных значений напряжений на двигателях и на резервном источнике питания, определении угла сдвига фаз между ними и фиксации времен достижения углом сдвига фаз трех заданных значений для параболической аппроксимация временной зависимости угла, с помощью которой прогнозируется время совпадения по фазе контролируемых напряжений.

6. Обоснована и разработана структура устройства быстродействующего автоматического включения резерва электроснабжения многомашинного электромеханического комплекса, отличающееся реализацией алгоритма синфазного переключения на резервный источник питания и использовании функции определения направления мощности. Экспериментально подтверждена работоспособность разработанного технического решения.

7. Анализ полученных экспериментальных данных в полной мере подтверждает результаты теоретических исследований (на математической модели), направленных на обеспечение бесперебойного электроснабжения электродвигателей многомашинных систем электромеханических комплексов, выполненных в работе.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВР – автоматический ввод резерва

БАВР – быстродействующий автоматический ввод резерва

АД – асинхронный двигатель

СД – синхронный двигатель

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства энергоустановок. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 704 с.
2. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий СН 174-75. – М.: Стройиздат, 1976. – 56 с.
3. Михайлов, В. В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / В. В. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1982. – 152 с.
4. Слодарж, М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М.И. Слодарж. – М.:«Энергия», 1977. – 216 с.
5. Алексеев, В. Ю. Выбор параметров схем электроснабжения НПС для обеспечения самозапуска электродвигателей /В.Ю. Алексеев // Сборник трудов УАГТУ. «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения. – 2010. – С. 18-20.
6. Носов, К.Б., Способы и средства самозапуска электродвигателей / К.Б. Носов, Н. М. Дворак. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.
7. Павлов, Г. М. Автоматика энергосистем: монография / Г. М. Павлов, Г. В. Меркурьев. – СПб.: [s. n.], 2001. – 388 с. : ил.
8. Голоднов, Ю. М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –136 с.
9. Сивокобыленко, В.Ф. Влияние режимов пуска и несинхронных повторных включений на срок службы изоляции / В.Ф. Сивокобыленко, В.И. Костенко // Электрические станции. – 1975. – № 7. – С. 67-71.
10. Сивокобыленко, В.Ф. Совершенствование схемы включения резервного питания асинхронных двигателей с учетом их группового выбега / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, К.А. Кукуй // Научные труды ДонГТУ. Серия: «Вычислительная техника и автоматизация». – 2002. – №38. – С.97-102.
11. Зинченко, А. И. Повышение надежности работы мощных электродвигателей при переходных процессах в узлах нагрузки энергосистем:

дис. ...канд. техн. наук: 05.14.02 / Зинченко Александр Иванович. – Донецк, 1983. – 244 с.

12. Гилязов, Р.Ф. Ограничение токов короткого замыкания на нефтеперекачивающих станциях / Р.Ф. Гилязов // Сборник трудов УАГТУ. «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения. – 2010. – С. 20-21

13. Аббасов, Э.М. Собственные нужды тепловых электростанций / Э.М. Аббасов, Ю. М. Голоднов, В.А. Зильберман, А.Г. Мурзаков; под ред. Ю.М. Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.: ил.

14. Абрамович, Б.Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт: СПб, 2008. – 88 с.

15. Сафонов, Д. О. Повышение надежности электротехнических систем объектов транспорта нефти и газа средствами быстродействующего резервирования питания: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Сафонов Дмитрий Олегович. – Москва, 2017. – 180 с.

16. «НПК Промир» Быстродействующий автоматический ввод резерва. Предотвращение потерь при нарушениях электроснабжения на предприятиях непрерывного цикла. [Электронный ресурс] «НПК Промир», – 2017, – 12 с. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/1357984/>

17. Жуков, В.А. Быстродействующее устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / В.А. Жуков, В.М. Пупин // Электрооборудований: Эксплуатация и ремонт. – 2011. – №9. – С. 11-18

18. Левченко, М.Т. Автоматическое включение резерва / М.Т. Левченко, М.Н. Хомяков. – М.: Энергия, 1971. – 80 с.

19. Беляев, А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности / А.В. Беляев. – М.: Энергопресс, 2004. – 80 с.

20. Киреева, Э. А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебник для студ. учреждений сред. проф. Образования / Э.А. Киреева, С.А. Цырук. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.

21. Барзам, А.Б. Системная автоматика / А.Б. Барзам. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.

22. Шабад, М.А. Релейная защита и автоматика на электроподстанциях, питающих синхронные двигатели / М.А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 64 с.

23. А.с. 693508 СССР, МКИ Н 02 J 9/06. Устройство для автоматического ввода резерва питания потребителей / Разгильдеев Г.И., Носов К.Б., Брагинский В.И. и др.; Кемеровский технолог. ин-т пищевой пром-ти. №2526208; Заявл. 16.09.77; Оpubл. в БИ, 1979, № 39.

24. А. с. 708463 Способ автоматического включения резервного питания потребителей / Фишман В.С., Никешин В.К., Квашенников В. А. Оpubл. в Б.И.1980, №1

25. А. с. 1046844. Устройство для автоматического включения резервного питания потребителей /Стальная М.И., Банкин С.А., Богатырев ЛЛ., Шевляков Э.Ф. Оpubл. в Б.И. 1983, № 37.

26. А. с.1422303 Способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные двигатели / Грузова О. Н., Рубашов Г. М. Оpubл. в Б.И. 1988, № 37.

27. А. с. 493858 Устройство для автоматического управления секционными выключателями при самозапуске / Чебан В. М., Удалов С. Н. Оpubл. в Б.И. 1979, № 47.

28. А. с. 1262627 СССР, МКИ Н 02 J 9/00. Способ включения резервного питания потребителей / Кузнецов В. Г., Ландман А. К., Пасынков Ю. А. Оpubл. в Б.И. 1986,. № 37

29. А. с. 1728927. Способ автоматического включения резерва. /С.И. Вершинина, С.И. Гамазин, С.А. Цырук и др. Оpubл. в Б.И. 1992. № 15.



30. А. с. 917261 Пусковое устройство для быстродействующего автоматического включения резервного питания потребителей / Сивокобыленко В.Ф., Гребченко Н.В. Оpubл. в Б.И. 1982, № 12.

31. А.с. 1304126. Пусковое устройство автоматического включения резервного питания потребителей /С.И. Гамазин, Д.И. Степанов, С.И. Вершинина, П.В. Гугучкин // Открытия. Изобретения. 1987. № 14.

32. Чебоксарский электроаппаратный завод. Каталог «блоки, комплекты и устройства релейной защиты и автоматики». – 2007. – с. 83

33. Муратбаев, Э. Х. Обоснование структуры и параметров многоуровневой системы электроснабжения объектов нефтедобычи с секционированием участков электрической сети: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Муратбаев Эдуард Хамитович. – С. Пб., 2009. – 135 с.

34. Дарибаев, А. С. Современные решения по быстродействующему автоматическому вводу резерва / А.С. Дарибаев // Энергетика. – 2014. – №1(48). – С.79-81

35. Жуков, В.А. Быстродействующее устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / В.А. Жуков, В.М. Пупин, С.И. Гамазин, А.И. Куликов, С.А. Цырук // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. –2011. – №9. – С. 11-18.

36. Киреева, Э. А. Современные устройства быстродействующего АВР / Э. А. Киреева, В. М. Пупин, Д. Т. Гумиров // Главный энергетик. –2005. – №11. – С. 23-26.

37. Гамазин, С. И. Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии / С.И. Гамазин, В.М. Пупин, Ю.В. Марков // Промышленная энергетика. – 2006. – №11. – С. 51-56.

38. Гумиров, Д. Т. Оценка влияния кратковременных нарушений электроснабжения на работу потребителей нефтедобывающих предприятий и разработка устройства АВР для надежного их электропитания: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Гумиров Дамир Тахирович. – Москва, 2010. – 206 с.

39. Пустоветов, М.Ю. Быстродействующее устройство автоматического ввода резерва для высоковольтных асинхронных двигателей и гидравлический удар / М.Ю. Пустоветов // Вестник ДГТУ. –2012. – №6(67). – С. 103-110.

40. Автоматический переключатель секций шин АПСШ Руководство по эксплуатации. ПАУИ.426471.002 РЭ, 2004. – 33 с.

41. НТЦ Энергоресурс. Устройство тиристорного автоматического ввода резерва. – Режим доступа: <http://en-res.ru/vysokovoltnyj-elektroprivod/ustrojstvo-tiristornogo-avtomaticheskogo-vvoda-rezerva-utvr-tavr.html>

42. 30 ms High Speed Transfer System (HSTS): Product / ABB Power and productivity for a better world, - 2011. - 12 с.

43. SUE3000 High Speed Transfer Device: Product Description / ABB Power and productivity for a better world, – 2010. – 24 с.

44. High Speed Transfer Device and System SUE 3000 Product Description / ABB Power and productivity for a better world, - 2010. – 49 с

45. Баширов, М.Г., Кузнецов А.С., Саблин С.А. Анализ параметров и характеристик при выборе устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) для систем электроснабжения предприятий нефтегазовой отрасли // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал . - №4. – 2013. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>

46. Siemens High-Speed Busbar Transfer System - Operation Manual / Siemens Power Automation Ltd, - 2012. - 14 с.

47. Multifunction High Speed Busbar Transfer Device 7VU683 / Siemens Power Automation Ltd. – 2014. – 24 с.

48. M-0272/236 Motor Bus Transfer Relay Instruction Book / Beckwith Electric Co, Inc. – 2002. – 235 с.

49. Charles J. Mozina Automatic High-Speed Transfer of Power Plant Auxiliary System Load—Theory and Application. / Charles J. Mozina //IEEE PES, 2005 Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa, 11-15 July 2005. – p. 332-336.

50. M-4272 Motor Bus Transfer System Instruction Book / Beckwith Electric Co, Inc. – 2005. – 338 с.

51. Orr G T, Cooper S, Mozina C J. High-speed transfer of two 4 KV motor bus sources using a digital motor bus transfer system. In: 2010 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference; 21–23 June 2010; San Antonio, TX, USA. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-7.

52. Patent US 7468593 B2 Digital system for motor bus transfer / Beckwith Electric Co, Inc. - US 11/599,128; заявка 14.11.2006; опубл. 23.12.2008

53. Жуков, В. А. Повышение эффективности работы быстродействующего АВР для подстанций с электродвигательной нагрузкой: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Жуков Владимир Анатольевич. – Москва, 2008. – 165 с.

54. Микропроцессорный блок пускового устройства быстродействующего автоматического ввода резерва для двухсекционных подстанций 6-10 кВ «БРЕСЛЕР-МЭИ МБПУ 0107.072.02» с блоком управления выключателем. Руководство по эксплуатации. – Чебоксары, 2007. – С.12-14.

55. Патент на изобретение 2326481(13) С1, Российская федерация, МПК Н02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Цырук С.А., Гамазин С.И., Пупин В.М., Козлов В.Н., Павлов А.О.; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет)" (ГОУВПО "МЭИ(ТУ)"). - № 2006139086/09; заявка 07.11.2006; опубл. 07.11.2006

56. Патент на изобретение 2447565(13) С1, Российская федерация, МПК Н02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Гамазин С.И., Жуков В. А., Куликов А.И., Пупин В.М., Цырук С.А.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВПО "НИУ МЭИ"). - № 2011105886/07; заявка 17.02.2011; опубл. 17.02.2011.

57. Патент на изобретение 2398338 (13) С1, Российская федерация, МПК Н02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей (варианты) и устройство для его осуществления / Жуков В. А., Пупин В.М., заявитель и правообладатель Жуков В. А., Пупин В.М.. - №2009130901; заявка 30.04.2009; опубл. 27.08.2010.

58. Чернин, А. Б. Расчёт электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности / А.Б. Чернин, С. Б. Лосев. – М.: Энергия, 1972. –144с.

59. Чабан, В. И. Основы теории переходных процессов электромашиных систем / В.И. Чабан. – Львов.: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1980. – 200 с.

60. Демирчан, К. С. Моделирование и машинный расчёт электрических цепей: Учеб. Пособие для электр. электроэнерг. спец. вузов. / К.С. Демирчан, П.А. Бутырин. – М.: Высш. шк ., 1988. – 335 с.

61. Славутский, А. Л. Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем: дис. ...канд. тех. наук: 05.09.03 / Славутский Александр Леонидович. – Чебоксары, 2016. – 159 с.

62. Гамазин, С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 421с.

63. Сивокобыленко, В. Ф. Математическое описание режимов группового выбега и самозапуска в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, К. А. Кукуй // Сборник научных трудов ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – 2003. – вып 67. – С. 5 -13.

64. Сивокобыленко, В. Ф. Математическое моделирование асинхронной нагрузки в режимах группового выбега и самозапуска / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, К. А. Кукуй // Сборник научных трудов ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – 2003. – вып 67. – С.28 – 34.

65. Веприк, Ю.Н. Моделирование систем электроснабжения с двигательной нагрузкой в переходных режимах / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Электротехника и промышленная электроника. – 2015. – № 6/1(26). – С.55-59.
66. Сивокобыленко, В.Ф. Математическая модель многомашинной системы для анализа поведения электродвигателей в режимах БАВР/ В.Ф. Сивокобыленко С.В. Деркачев // Научные труды ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – 2014. – №1(16). – С. 171-178
67. Веприк, Ю.Н. Унифицированные модели элементов систем электроснабжения на основе уравнений в фазных координатах / Ю.Н. Веприк, О.А. Небера // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 6. – С.56-60.
68. Nikolay F. method of transient electromechanical processes modeling in power systems/ F. Nikolay, A. Djagarov // IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, 2009
69. Кукуй К.А.. Моделирование режимов группового выбега и повышение эффективности работы узлов энергосистемы с двигательной нагрузкой: дис. ...кан. техн. наук: 05.14.02 / Кукуй Константин Абрамович. – Донецк, 2004. – 237 с.
70. Бондаренко, В.Е. Уравнения и параметры электрических машин в моделях электрических сетей с узлами двигательной нагрузки / В.Е. Бондаренко, В.Ю. Веприк // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 4. – С.14-16.
71. Небера, О. А. Совершенствование методов и средств моделирования систем электроснабжения с двигательной нагрузкой: дис. ...канд. техн. наук: 05.14.02 / Небера Ольга Алексеевна. – Харьков, 2016. – 170 с.
72. Куцик, А. С. Математическое моделирование элементов электромеханических систем согласно принципам объектно-ориентированного подхода / А.С. Куцик // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2005. – вып. 64. – С. 10-18.
73. GHERBI Ahmed Object-Oriented Modeling with UML for Power System Simulation // 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 November 2007

74. Noda, T. Object oriented design of a transient analysis program. Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07). Paper No. 111, France, 4–7 June 2007

75. Selvan, M.P. and Swarup K.S. (2004) Large scale power system computations with object-oriented design. / M.P. Selvan, K.S. Swarup //Proceedings of IEEE PES General Meeting, Colorado, USA, p.330-335

76. Официальный сайт компании MathWorks . – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>

77. Официальный сайт компании DlgSILENT . – Режим доступа: <http://www.digsilent.de/>

78. Официальный сайт компании Elesk . – Режим доступа: <http://www.eleks.com/>

79. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-ое изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

80. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество – 1998. – №4. – С. 38-42.

81. Артишевская, С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин / С.В. Артишевская // Электричество. – 1999. – №11. – С. 29-31.

82. Джендубаев, А.Р. Математическое моделирование асинхронного генератора с учётом потерь в стали / А.-З.Р. Джендубаев // Электричество. – 2003. – № 7. – С. 36-46.

83. Виноградов, А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника.–2005. – №5. – С. 57-61.

84. Boglietti, A. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance / A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris [and others] // IEEE Transaction on Energy Conversion. – Vol. 23. – 2008. – p. 796- 803.

85. Сивокобыленко, В.Ф. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин / В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков // Электричество – 1979. – № 10 – С. 35-39.

86. Сивокобыленко, В.Ф. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Сборник научных трудов ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – 2007. – вып. 7 (128). –С. 126 -131.

87. Сивокобыленко, В.Ф. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко, С.В. Деркачев // Электричество. –2014. –№ 10. –С. 38-44.

88. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин .– Санкт-Петербург:Питер, 2004. – 463 с.

89. Сивокобыленко, В.Ф. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, В.И. Костенко. – Донецк: ДПИ, 1979. – 111с.

90. Сивокобыленко, В.Ф. Определение параметров схем замещения и характеристик синхронных турбодвигателей / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев // Научные труды ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – 2014. – №1(16). –С. 189-193.

91. Лютер, Р. А. Расчет синхронных машин / Р. А. Лютер. – Л. : Энергия, 1979 . – 272 с.

92. Мелешкин, Г.А. Устойчивость энергосистем / Г.А. Мелешкин, Г.В Меркурьев. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.

93. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов –М.-Л.: Энергия, 1964. – 704 с.

94. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. Вузов / В.А. Веников. – М.: Высш.шк.,1985. –536 с.

95. Чабан, В.И. Основы теории переходных процессов электромашиных систем / В.И. Чабан –Львов.:Высш школа,1980. – 200 с.

96. Пивняк, Г.Г. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник для вузов. / Г.Г. Пивняк, В.Н. Винославский, А.Я. Рыбалко, Л.И. Нессен; Под ред. акад. НАН Украины Г.Г. Пивняка. –Москва: Энергоатомиздат; Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 548 с.

97. Бутырин, П.А. Аналитическое обращение матриц индуктивностей уравнений состояния электрических машин./ П.А. Бутырин, Чинь Хунг Лян // Электричество. – 1995. – №2. – С.63-69.

98. Сивокобыленко, В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике. Учебное пособие / В.Ф. Сивокобыленко, Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.

99. Сивокобыленко, В.Ф. Метод эквивалентных синусоид для цифровых измерительных органов релейной защиты/ В.Ф. Сивокобыленко С.В. Деркачев // Научные труды ДонНТУ. Серия: «Вычислительная техника и автоматизация». – 2015– № 1(28). – С. 215-221.

100. Сивокобыленко, В.Ф. Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой / В.Ф. Сивокобыленко, С.В. Деркачев // Электромеханические и энергосберегающие системы. Ежеквартальный научно производственный журнал. – 2015. – вып. 3/2015 (31). – С. 126-133.

101. Сверхбыстродействующие выключатели ВВ/TEL / Энергетика оборудование документация. – Режим доступа:  
<http://forca.ru/stati/podstancii/sverhbystrodeystvuyuschie-vyklyuchateli-vv-tel.html>

102. Официальный сайт STMicroelectronics. – Режим доступа:  
<http://www.st.com/web/en/home.html>.

103. Датчик тока LA 55-P/SP1 . – Режим доступа:  
<http://www.sensorica.ru/pdf/la55-p-sp1.pdf>



104. RAYEX ELECTRONICS LEG-5. – Режим доступа:

<https://www.tme.eu/ru/details/leg-5/rele-elektromagn-miniatiurnye/rayex-electronics/>

105. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента. Учебное пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Определение параметров эквивалентных схем замещения

## А.1 Определение параметров схем замещения асинхронных электродвигателей

## А.1.1 Расчёт параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя ДАМСО 148-8

Для определения начальных приближения параметров для решения системы (2.1), используется инженерный метод расчёта параметров эквивалентной схемы замещения, приведенный в п. 2.1.

В таблице А.1 приведены каталожные данные асинхронного двигателя ДАМСО 148-8.

Таблица А.1 – Каталожные данные двигателя ДАМСО 148-8

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\phi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{\Gamma}$ , о.е.	$M_{\Gamma}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.
ДАМСО 148-8	240	32	740	0,84	0,9	4,6	0,9	2,1

Активное и индуктивное сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя определяется по формулам:

$$R_S = S_H = 0,0133 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot I_{\Gamma}} = \frac{1}{2 \cdot 4,6} = 0,109 \text{ о.е.},$$

Пренебрегая потерями в стали, номинальные значения коэффициента мощности и КПД могут быть рассчитаны по формулам:

$$\eta_H' = 1 - R_S - \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H \cdot S_H}{1 - S_H} = 1 - 0,0133 - \frac{0,9 \cdot 0,84 \cdot 0,0133}{1 - 0,0133} = 0,977 \text{ о.е.},$$

$$\cos\phi_H^1 = \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H}{\eta_H^1} = \frac{0,9 \cdot 0,84}{0,977} = 0,774 \text{ о.е.}$$

Из круговой диаграммы асинхронного двигателя ток намагничивания определяется по следующей формуле:

$$i_{\mu} = \sin \phi_H' - \left( M_{\max} - \sqrt{M_{\max}^2 - 1} \right) \cdot \cos \phi_H' = 0,633 - \left( 2,1 - \sqrt{2,1^2 - 1} \right) \cdot 0,774 = 0,437 \text{ о.е.}$$

Зная ток намагничивания  $i_{\mu}$  и индуктивное сопротивление статора  $X_{\sigma S}$ , индуктивное сопротивление ветви намагничивания может быть рассчитано как:

$$X_{\mu} = \frac{1}{i_{\mu}} - X_{\sigma S} = \frac{1}{0,437} - 0,109 = 2,179 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{BX}^{SH}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{SH}$  сопротивления асинхронного двигателя при номинальном скольжении принимаются равными соответственно:

$$R_{BX}^{SH} = \cos \phi_H' = 0,774 \text{ о.е.},$$

$$X_{BX}^{SH} = \sin \phi_H' = 0,633 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{ex}^{S=1}$  и входное индуктивное  $X_{ex}^{S=1}$  сопротивления асинхронного двигателя при скольжении равном единице принимаются равными:

$$R_{ex}^{S=1} = R_S + \frac{M_{\Pi} \cdot \cos \phi_H' \cdot \eta_H'}{I_{\Pi}^2 \cdot (1 - S_H)} = 0,0133 + \frac{0,9 \cdot 0,774 \cdot 0,977}{4,6^2 \cdot (1 - 0,0133)} = 0,046 \text{ о.е.},$$

$$X_{ex}^{S=1} = \sqrt{\frac{1}{I_{\Pi}^2} - \left( R_{ex}^{S=1} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{4,6^2} - 0,046^2} = 0,212 \text{ о.е.}$$

Активная  $g_r^{SH}$  и реактивная  $b_r^{SH}$  проводимости первого контура ротора для номинального скольжения рассчитываются следующим образом:

$$g_r^{SH} = \frac{R_{ex}^{SH} - R_S}{\left( R_{ex}^{SH} - R_S \right)^2 + \left( X_{ex}^{SH} - X_{\sigma S} \right)^2} = \frac{0,774 - 0,0133}{\left( 0,774 - 0,0133 \right)^2 + \left( 0,633 - 0,109 \right)^2} = 0,892 \text{ о.е.},$$

$$b_r^{SH} = \frac{X_{ex}^{SH} - X_{\sigma S}}{\left( R_{ex}^{SH} - R_S \right)^2 + \left( X_{ex}^{SH} - X_{\sigma S} \right)^2} - \frac{1}{X_{\mu}} = \frac{0,633 - 0,109}{\left( 0,774 - 0,0133 \right)^2 + \left( 0,633 - 0,109 \right)^2} - \frac{1}{2,179} = 0,155 \text{ о.е.}$$

Зная активную  $g_r^{SH}$  и реактивную  $b_r^{SH}$  проводимости первого контура ротора можно определить активное  $R_{r1}$  и индуктивное  $X_{\sigma r1}$  сопротивления первого контура ротора:

$$R_{r1} = \frac{g_r^{SH} \cdot S_H}{\left( g_r^{SH} \right)^2 + \left( b_r^{SH} \right)^2} = \frac{0,892 \cdot 0,0133}{0,892^2 + 0,155^2} = 0,014 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r1} = \frac{b_r^{SH}}{\left( g_r^{SH} \right)^2 + \left( b_r^{SH} \right)^2} = \frac{0,155}{0,892^2 + 0,155^2} = 0,189 \text{ о.е.}$$

Аналогичным образом определяются известные проводимости, активное  $R_{r2}$  и индуктивное  $X_{\sigma r2}$  сопротивления второго контура ротора:

$$g_{r2}^{S=1} = g_r^{S=1} - \frac{R_{r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 2,8 - \frac{0,046}{0,046^2 + 0,212^2} = 1,823 \text{ о.е.},$$

$$b_{r2}^{S=1} = b_r^{S=1} - \frac{X_{\sigma r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 8,361 - \frac{0,212}{0,046^2 + 0,212^2} = 3,856 \text{ о.е.},$$

$$R_{r2} = \frac{g_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{1,823}{1,823^2 + 3,856^2} = 0,1 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r2} = \frac{b_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{3,856}{1,823^2 + 3,856^2} = 0,212 \text{ о.е.}$$

После определения начальных приближений параметров выполняется их уточнение путем решения переопределенной системы уравнений и неравенств (2.1) с помощью одного из численных методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска минимума функционала невязки или др. Полученные параметры эквивалентной схемы замещения, приведенные в таблице А.2.

Таблица А.2 – Параметры эквивалентной схемы замещения двигателя

Тип двигателя	$R_s$	$X_{\sigma s}$	$X_\mu$	$R_{fe}$	$X_{\sigma fe}$	$R_{r1}$	$X_{\sigma r1}$	$R_{r2}$	$X_{\sigma r2}$
ДАМСО 148-8	0,044	0,109	2,471	19,825	11,915	0,016	0,166	0,164	0,188

#### А.1.2 Расчёт параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя ВДД 213/54-16

Для определения начальных приближений параметров схемы замещения для решения системы (2.1), используется инженерный метод расчёта параметров эквивалентной схемы замещения, приведенный в п. 2.1.

В таблице А.3 приведены каталожные данные асинхронного двигателя ДАМСО 148-8.

Таблица А.3 – Каталожные данные двигателя ВДД 213/54-16

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\varphi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{\Pi}$ , о.е.	$M_{\Pi}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.
ВДД 213/54-16	1700	215	368	0,81	0,94	5,4	1,3	2,5

Активное и индуктивное сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя найдем по формулам:

$$R_S = S_H = 0,019 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot I_{II}} = \frac{1}{2 \cdot 5,4} = 0,093 \text{ о.е.},$$

Пренебрегая потерями в стали, выполняется коррекция номинальных значений коэффициента мощности и КПД:

$$\eta'_H = 1 - R_S - \frac{\eta_H \cdot \cos \phi_H \cdot S_H}{1 - S_H} = 1 - 0,019 - \frac{0,94 \cdot 0,81 \cdot 0,019}{1 - 0,019} = 0,966 \text{ о.е.},$$

$$\cos \phi_H^1 = \frac{\eta_H \cdot \cos \phi_H}{\eta_n^1} = \frac{0,94 \cdot 0,81}{0,966} = 0,886 \text{ о.е.}$$

Из круговой диаграммы асинхронного двигателя ток намагничивания рассчитывается по следующей формуле:

$$i_\mu = \sin \phi_H^1 - \left( M_{\max} - \sqrt{M_{\max}^2 - 1} \right) \cdot \cos \phi_H^1 = 0,5 - \left( 2,5 - \sqrt{2,5^2 - 1} \right) \cdot 0,886 = 0,315 \text{ о.е.}$$

Зная ток намагничивания  $i_\mu$  и индуктивное сопротивление статора  $X_{\sigma S}$ , индуктивное сопротивление ветви намагничивания может быть рассчитано как:

$$X_\mu = \frac{1}{i_\mu} - X_{\sigma S} = \frac{1}{0,315} - 0,093 = 3,082 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{BX}^{SH}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{SH}$  сопротивления асинхронного двигателя при номинальном скольжении принимаются равными соответственно:

$$R_{BX}^{SH} = \cos \phi_H^1 = 0,886 \text{ о.е.},$$

$$X_{BX}^{SH} = \sin \phi_H^1 = 0,5 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{BX}^{S=1}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{S=1}$  сопротивления асинхронного двигателя при скольжении равном единице принимаются равными:

$$R_{BX}^{S=1} = R_S + \frac{M_{II} \cdot \cos \phi_H^1 \cdot \eta_H^1}{I_{II}^2 \cdot (1 - S_H)} = 0,019 + \frac{1,3 \cdot 0,886 \cdot 0,966}{5,4^2 \cdot (1 - 0,019)} = 0,058 \text{ о.е.},$$

$$X_{BX}^{S=1} = \sqrt{\frac{1}{I_{II}^2} - \left( R_{BX}^{S=1} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{5,4^2} - 0,058^2} = 0,176 \text{ о.е.}$$

Активная  $g_r^{S_H}$  и реактивная  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора для номинального скольжения рассчитываются следующим образом:

$$g_r^{S_H} = \frac{R_{ex}^{S_H} - R_S}{(R_{ex}^{S_H} - R_S)^2 + (X_{ex}^{S_H} - X_{\sigma S})^2} = \frac{0,886 - 0,019}{(0,886 - 0,019)^2 + (0,5 - 0,093)^2} = 0,945 \text{ о.е.},$$

$$b_r^{S_H} = \frac{X_{ex}^{S_H} - X_{\sigma S}}{(R_{ex}^{S_H} - R_S)^2 + (X_{ex}^{S_H} - X_{\sigma S})^2} - \frac{1}{X_\mu} = \frac{0,5 - 0,093}{(0,886 - 0,019)^2 + (0,5 - 0,093)^2} - \frac{1}{3,082} = 0,119 \text{ о.е.}$$

Зная активную  $g_r^{S_H}$  и реактивную  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора можно определить активное  $R_{r1}$  и индуктивное  $X_{\sigma r1}$  сопротивления первого контура ротора:

$$R_{r1} = \frac{g_r^{S_H} \cdot S_H}{(g_r^{S_H})^2 + (b_r^{S_H})^2} = \frac{0,945 \cdot 0,019}{0,945^2 + 0,119^2} = 0,02 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r1} = \frac{b_r^{S_H}}{(g_r^{S_H})^2 + (b_r^{S_H})^2} = \frac{0,119}{0,945^2 + 0,119^2} = 0,131 \text{ о.е.}$$

Аналогичным образом определяются известные проводимости, активное  $R_{r2}$  и индуктивное  $X_{\sigma r2}$  сопротивления второго контура ротора:

$$g_{r2}^{S=1} = g_r^{S=1} - \frac{R_{r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 4,637 - \frac{0,058}{0,058^2 + 0,176^2} = 2,948 \text{ о.е.},$$

$$b_{r2}^{S=1} = b_r^{S=1} - \frac{X_{\sigma r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 9,545 - \frac{0,176}{0,058^2 + 0,176^2} = 4,42 \text{ о.е.},$$

$$R_{r2} = \frac{g_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{2,948}{2,948^2 + 4,42^2} = 0,104 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r2} = \frac{b_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{4,42}{2,948^2 + 4,42^2} = 0,157 \text{ о.е.}$$

После определения начальных приближений параметров выполняется их уточнение путем решения переопределенной системы уравнений и неравенств (2.1) с помощью одного из численных методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска минимума функционала невязки или др. Полученные параметры эквивалентной схемы замещения, приведенные в таблице А.4.

Таблица А.4 – Параметры эквивалентной схемы замещения двигателя

Тип двигателя	$R_s$	$X_{os}$	$X_\mu$	$R_{fe}$	$X_{ofe}$	$R_{r1}$	$X_{or1}$	$R_{r2}$	$X_{or2}$
ВДД 213/54-16	0,017	0,093	2,140	37,215	20,896	0,028	0,242	0,082	0,128

### А.1.3 Расчёт параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя ДАЗО 1914-10/12А

Для определения начальных приближений параметров схемы замещения для решения системы (2.1), используется инженерный метод расчёта параметров эквивалентной схемы замещения, приведенный в п. 2.1.

В таблице А.5 приведены каталожные данные асинхронного двигателя ДАМСО 148-8.

Таблица А.5 – Каталожные данные двигателя ДАЗО 1914-10/12А

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\phi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{II}$ , о.е.	$M_{II}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.
ДАЗО 1914-10/12А	1500	204	597	0,77	0,91	5,5	0,9	2,5

Активное и индуктивное сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя рассчитываются по формулам:

$$R_S = S_H = 0,04 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot I_{II}} = \frac{1}{2 \cdot 5,5} = 0,091 \text{ о.е.},$$

Пренебрегая потерями в стали, корректируются номинальные значения коэффициента мощности и КПД:

$$\eta'_H = 1 - R_S - \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H \cdot S_H}{1 - S_H} = 1 - 0,041 - \frac{0,91 \cdot 0,77 \cdot 0,041}{1 - 0,041} = 0,929 \text{ о.е.},$$

$$\cos\phi_H^1 = \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H}{\eta_H^1} = \frac{0,91 \cdot 0,77}{0,929} = 0,754 \text{ о.е.}$$

Из круговой диаграммы асинхронного двигателя ток намагничивания рассчитывается по следующей формуле:

$$i_\mu = \sin\phi_H^1 - \left( M_{\max} - \sqrt{M_{\max}^2 - 1} \right) \cdot \cos\phi_H^1 = 0,657 - \left( 2,5 - \sqrt{2,5^2 - 1} \right) \cdot 0,754 = 0,5 \text{ о.е.}$$

Зная ток намагничивания  $i_\mu$  и индуктивное сопротивление статора  $X_{\sigma S}$ , индуктивное сопротивление ветви намагничивания может быть рассчитано как:

$$X_\mu = \frac{1}{i_\mu} - X_{\sigma S} = \frac{1}{0,5} - 0,091 = 1,909 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{BX}^{SH}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{SH}$  сопротивления асинхронного двигателя при номинальном скольжении принимаются равными соответственно:

$$R_{BX}^{SH} = \cos \phi_H' = 0,754 \text{ о.е.},$$

$$X_{BX}^{SH} = \sin \phi_H' = 0,657 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{\text{ex}}^{S=1}$  и входное индуктивное  $X_{\text{ex}}^{S=1}$  сопротивления асинхронного двигателя при скольжении равном единице принимаются равными:

$$R_{\text{ex}}^{S=1} = R_S + \frac{M_\Pi \cdot \cos \phi_H' \cdot \eta_H'}{I_\Pi^2 \cdot (1 - S_H)} = 0,041 + \frac{0,9 \cdot 0,754 \cdot 0,929}{5,5^2 \cdot (1 - 0,041)} = 0,063 \text{ о.е.},$$

$$X_{\text{ex}}^{S=1} = \sqrt{\frac{1}{I_\Pi^2} - (R_{\text{ex}}^{S=1})^2} = \sqrt{\frac{1}{5,5^2} - 0,063^2} = 0,171 \text{ о.е.}$$

Активная  $g_r^{SH}$  и реактивная  $b_r^{SH}$  проводимости первого контура ротора для номинального скольжения рассчитываются следующим образом:

$$g_r^{SH} = \frac{R_{\text{ex}}^{SH} - R_S}{(R_{\text{ex}}^{SH} - R_S)^2 + (X_{\text{ex}}^{SH} - X_{\sigma S})^2} = \frac{0,754 - 0,041}{(0,754 - 0,041)^2 + (0,657 - 0,091)^2} = 0,415 \text{ о.е.},$$

$$b_r^{SH} = \frac{X_{\text{ex}}^{SH} - X_{\sigma S}}{(R_{\text{ex}}^{SH} - R_S)^2 + (X_{\text{ex}}^{SH} - X_{\sigma S})^2} - \frac{1}{X_\mu} = \frac{0,657 - 0,091}{(0,754 - 0,041)^2 + (0,657 - 0,091)^2} - \frac{1}{1,909} = 0,159 \text{ о.е.}$$

Зная активную  $g_r^{SH}$  и реактивную  $b_r^{SH}$  проводимости первого контура ротора можно определить активное  $R_{r1}$  и индуктивное  $X_{\sigma r1}$  сопротивления первого контура ротора:

$$R_{r1} = \frac{g_r^{SH} \cdot S_H}{(g_r^{SH})^2 + (b_r^{SH})^2} = \frac{0,415 \cdot 0,041}{0,415^2 + 0,159^2} = 0,086 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r1} = \frac{b_r^{SH}}{(g_r^{SH})^2 + (b_r^{SH})^2} = \frac{0,159}{0,415^2 + 0,159^2} = 0,805 \text{ о.е.}$$



Аналогичным образом определяются известные проводимости, активное  $R_{r2}$  и индуктивное  $X_{\sigma r2}$  сопротивления второго контура ротора:

$$g_{r2}^{S=1} = g_r^{S=1} - \frac{R_{r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 3,169 - \frac{0,063}{0,063^2 + 0,171^2} = 1,272 \text{ о.е.},$$

$$b_{r2}^{S=1} = b_r^{S=1} - \frac{X_{\sigma r1}^{S=1}}{(R_{r1}^{S=1})^2 + (X_{\sigma r1}^{S=1})^2} = 11,621 - \frac{0,171}{0,063^2 + 0,171^2} = 6,472 \text{ о.е.},$$

$$R_{r2} = \frac{g_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{1,272}{1,272^2 + 6,472^2} = 0,029 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r2} = \frac{b_{r2}^{S=1}}{(g_{r2}^{S=1})^2 + (b_{r2}^{S=1})^2} = \frac{6,472}{1,272^2 + 6,472^2} = 0,149 \text{ о.е.}$$

После определения начальных приближений параметров выполняется их уточнение путем решения переопределенной системы уравнений и неравенств (2.1) с помощью одного из численных методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска минимума функционала невязки или др. Полученные параметры эквивалентной схемы замещения, приведенные в таблице А.6.

Таблица А.6 – Параметры эквивалентной схемы замещения двигателя

Тип двигателя	$R_s$	$X_{\sigma s}$	$X_\mu$	$R_{fe}$	$X_{\sigma fe}$	$R_{r1}$	$X_{\sigma r1}$	$R_{r2}$	$X_{\sigma r2}$
ДАЗО 1914-10/12А	0,041	0,091	1,812	24,514	14,644	0,006	0,145	0,108	0,166

#### А.1.4 Расчёт параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя АВ 113-4

Для определения начальных приближений параметров схемы замещения для решения системы (2.1), используется инженерный метод расчёта параметров эквивалентной схемы замещения, приведенный в п. 2.1.

В таблице А.7 приведены каталожные данные асинхронного двигателя АВ 113-4.

Таблица А.7 – Каталожные данные двигателя АВ 113-4

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n$ , об/мин	$\cos\phi_H$ , о.е.	$\eta_H$ , о.е.	$I_{II}$ , о.е.	$M_{II}$ , о.е.	$M_M$ , о.е.
АВ 113-4	250	29	1480	0,89	0,92	5,8	1,1	2,2

Активное и индуктивное сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя рассчитываются по формулам:

$$R_S = S_H = 0,013 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot I_{II}} = \frac{1}{2 \cdot 5,6} = 0,086 \text{ о.е.},$$

Пренебрегая потерями в стали, корректируются номинальные значения коэффициента мощности и КПД:

$$\eta'_H = 1 - R_S - \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H \cdot S_H}{1 - S_H} = 1 - 0,013 - \frac{0,92 \cdot 0,89 \cdot 0,013}{1 - 0,013} = 0,976 \text{ о.е.},$$

$$\cos\phi'_H = \frac{\eta_H \cdot \cos\phi_H}{\eta'_H} = \frac{0,92 \cdot 0,89}{0,976} = 0,834 \text{ о.е.}$$

Из круговой диаграммы асинхронного двигателя ток намагничивания рассчитывается по следующей формуле:

$$i_\mu = \sin\phi'_H - \left( M_{\max} - \sqrt{M_{\max}^2 - 1} \right) \cdot \cos\phi'_H = 0,552 - \left( 2,2 - \sqrt{2,2^2 - 1} \right) \cdot 0,834 = 0,351 \text{ о.е.}$$

Зная ток намагничивания  $i_\mu$  и индуктивное сопротивление статора  $X_{\sigma S}$ , индуктивное сопротивление ветви намагничивания может быть рассчитано как:

$$X_\mu = \frac{1}{i_\mu} - X_{\sigma S} = \frac{1}{0,351} - 0,086 = 2,763 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{BX}^{SH}$  и входное индуктивное  $X_{BX}^{SH}$  сопротивления асинхронного двигателя при номинальном скольжении принимаются равными соответственно:

$$R_{ex}^{SH} = \cos\phi'_H = 0,834 \text{ о.е.},$$

$$X_{ex}^{SH} = \sin\phi'_H = 0,552 \text{ о.е.}$$

Входное активное  $R_{ex}^{S=1}$  и входное индуктивное  $X_{ex}^{S=1}$  сопротивления асинхронного двигателя при скольжении равном единице принимаются равными:

$$R_{\text{ex}}^{S=1} = R_s + \frac{M_{\Pi} \cdot \cos \phi_H' \cdot \eta_H'}{I_{\Pi}^2 \cdot (1 - S_H)} = 0,013 + \frac{1,1 \cdot 0,834 \cdot 0,976}{5,8^2 \cdot (1 - 0,013)} = 0,04 \text{ о.е.},$$

$$X_{\text{ex}}^{S=1} = \sqrt{\frac{1}{I_{\Pi}^2} - \left(R_{\text{ex}}^{S=1}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{5,8^2} - 0,04^2} = 0,172 \text{ о.е.}$$

Активная  $g_r^{S_H}$  и реактивная  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора для номинального скольжения рассчитываются следующим образом:

$$g_r^{S_H} = \frac{R_{\text{ex}}^{S_H} - R_s}{\left(R_{\text{ex}}^{S_H} - R_s\right)^2 + \left(X_{\text{ex}}^{S_H} - X_{\sigma S}\right)^2} = \frac{0,934 - 0,013}{\left(0,934 - 0,013\right)^2 + \left(0,552 - 0,086\right)^2} = 2,876 \text{ о.е.},$$

$$b_r^{S_H} = \frac{X_{\text{ex}}^{S_H} - X_{\sigma S}}{\left(R_{\text{ex}}^{S_H} - R_s\right)^2 + \left(X_{\text{ex}}^{S_H} - X_{\sigma S}\right)^2} - \frac{1}{X_{\mu}} = \frac{0,552 - 0,086}{\left(0,934 - 0,013\right)^2 + \left(0,552 - 0,086\right)^2} - \frac{1}{2,763} = 1,093 \text{ о.е.}$$

Зная активную  $g_r^{S_H}$  и реактивную  $b_r^{S_H}$  проводимости первого контура ротора можно определить активное  $R_{r1}$  и индуктивное  $X_{\sigma r1}$  сопротивления первого контура ротора:

$$R_{r1} = \frac{g_r^{S_H} \cdot S_H}{\left(g_r^{S_H}\right)^2 + \left(b_r^{S_H}\right)^2} = \frac{2,876 \cdot 0,013}{2,876^2 + 1,093^2} = 0,004 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r1} = \frac{b_r^{S_H}}{\left(g_r^{S_H}\right)^2 + \left(b_r^{S_H}\right)^2} = \frac{0,159}{0,415^2 + 0,159^2} = 0,115 \text{ о.е.}$$

Аналогичным образом определяются известные проводимости, активное  $R_{r2}$  и индуктивное  $X_{\sigma r2}$  сопротивления второго контура ротора:

$$g_{r2}^{S=1} = g_r^{S=1} - \frac{R_{r1}^{S=1}}{\left(R_{r1}^{S=1}\right)^2 + \left(X_{\sigma r1}^{S=1}\right)^2} = 3,323 - \frac{0,04}{0,04^2 + 0,172^2} = 2,04 \text{ о.е.},$$

$$b_{r2}^{S=1} = b_r^{S=1} - \frac{X_{\sigma r1}^{S=1}}{\left(R_{r1}^{S=1}\right)^2 + \left(X_{\sigma r1}^{S=1}\right)^2} = 10,585 - \frac{0,172}{0,04^2 + 0,172^2} = 5,069 \text{ о.е.},$$

$$R_{r2} = \frac{g_{r2}^{S=1}}{\left(g_{r2}^{S=1}\right)^2 + \left(b_{r2}^{S=1}\right)^2} = \frac{2,04}{2,04^2 + 5,069^2} = 0,068 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma r2} = \frac{b_{r2}^{S=1}}{\left(g_{r2}^{S=1}\right)^2 + \left(b_{r2}^{S=1}\right)^2} = \frac{5,069}{2,04^2 + 5,069^2} = 0,17 \text{ о.е.}$$

После определения начальных приближений параметров выполняется их уточнение путем решения переопределенной системы уравнений и неравенств (2.1) с помощью одного из численных методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска

минимума функционала невязки или др. Полученные параметры эквивалентной схемы замещения, приведенные в таблице А.8.

Таблица А.8 – Параметры эквивалентной схемы замещения двигателя

Тип двигателя	$R_s$	$X_{os}$	$X_\mu$	$R_{fe}$	$X_{afe}$	$R_{r1}$	$X_{or1}$	$R_{r2}$	$X_{or2}$
АВ 113-4	0,034	0,086	3,415	24,765	14,763	0,019	0,274	0,051	0,101

## А.2 Определение параметров схем замещения синхронных электродвигателей

### А.2.1 Определение параметров эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя ДСЗ-2209

В таблице А.9 представлены каталожные данные синхронного двигателя ДСЗ-2209, необходимые для расчёта параметров эквивалентной схемы замещения.

Таблица А.9 – Исходные каталожные данные явнополусных синхронных двигателя ДСЗ-2209

№	Тип двигателя	$I_H, A$	$n, \text{об/мин}$	$\cos\varphi_H, \text{о.е.}$	$\eta_H, \text{о.е.}$	$I_{\Pi}, \text{о.е.}$	$M_{\Pi}, \text{о.е.}$	$M_M, \text{о.е.}$	$I_{fH}, A$	$U_{fH}, B$	$T_{f0}, \text{о.е.}$
СД1	ДСЗ-2209	274	100	0,9	0,938	5,2	1,5	1,3	275	192	1,44

Синхронное индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  определяется по формулам:

$$X_q = \frac{\sin\phi_H + \cos\phi_H \cdot \sqrt{M_M^2 \eta_H^2 - 1}}{M_M^2 \eta_H^2 \cos^2\phi_H} = \frac{0,436 + 0,9 \cdot \sqrt{2,3^2 \cdot 0,938^2 - 1}}{2,3^2 \cdot 0,938^2 \cdot 0,9^2 - 1} = 0,778 \text{ о.е.},$$

$$X_d = 1,67 \cdot X_q = 1,67 \cdot 0,778 = 1,297 \text{ о.е.}$$

Индуктивное сопротивления рассеяния статора  $X_{os}$  и индуктивные сопротивления ветвей намагничивания по осям  $d$  и  $q$  рассчитываются по следующим выражениям:

$$X_{\sigma s} = \frac{1}{2 \cdot K_i} = \frac{1}{2 \cdot 5,2} = 0,0962 \text{ о.е.},$$

$$X_{md} = X_d - X_{\sigma s} = 1,297 - 0,0962 = 1,2 \text{ о.е.},$$

$$X_{mq} = X_q - X_{\sigma s} = 0,778 - 0,0962 = 0,682 \text{ о.е.}$$

Параметры обмотки возбуждения определяются по её известной постоянной времени  $T_{f0}$ , приняв в качестве исходных соотношения:

$$X_{\sigma f} = \frac{X_{md}}{I_{II} \cdot X_{md} - 1} = \frac{1,2}{5,2 \cdot 1,2 - 1} = 0,229 \text{ о.е.},$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_{f0}} = \frac{0,229 + 1,2}{314 \cdot 1,44} = 0,00316 \text{ о.е.}$$

Активное сопротивление обмотки статора  $R_s$  можно определить, приняв допущение, что потери в меди статора в номинальном режиме составляют 25–30% от общих потерь:

$$R_s \cong 0,25 \cdot (1 - \eta_H) = 0,25 \cdot (1 - 0,938) = 0,0155 \text{ о.е.}$$

С учетом несимметрии ротора по осям принимается:

$$m_q^{\pi} \cong 1,2 \cdot M_{II} \eta_H \cos \phi_H = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 0,938 \cdot 0,9 = 1,52 \text{ о.е.},$$

$$i_{sq}^{\pi} = 0,8 \cdot I_{II} = 0,8 \cdot 5,2 = 4,16 \text{ о.е.}$$

Входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $q$  теперь определяются по следующим формулам:

$$R_{\text{ex}q}^{s=1} = R_s + \frac{m_q^{\pi}}{(i_{sq}^{\pi})^2} = 0,0155 + \frac{1,52}{4,16^2} = 0,1033 \text{ о.е.},$$

$$X_{\text{ex}q}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sq}^{\pi}}\right)^2 - \left(R_{\text{ex}q}^{s=1}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{4,16^2} - 0,1033^2} = 0,217 \text{ о.е.}$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $q$  рассчитываются по формулам:

$$R_{rmq}^{s=1} = R_{\text{ex}q}^{s=1} - R_s = 0,1033 - 0,0155 = 0,0878 \text{ о.е.},$$

$$X_{rmq}^{s=1} = X_{exq}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,217 - 0,0962 = 0,1209 \text{ о.е.}$$

Проводимости пусковой обмотки по оси  $q$  могут быть определены по следующим формулам:

$$g_{rq} = \frac{R_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} = \frac{0,0878}{0,0878^2 + 0,1209^2} = 3,933 \text{ о.е.},$$

$$b_{rq} = \frac{X_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} - \frac{1}{X_{mq}} = \frac{0,1209}{0,0878^2 + 0,1209^2} - \frac{1}{0,682} = 3,95 \text{ о.е.}$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $q$  на основе известных проводимостей рассчитываются по формулам:

$$R_{rq} = \frac{g_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} \cdot S = \frac{3,933}{3,933^2 + 3,95^2} \cdot 1 = 0,127 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma rq} = \frac{b_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} = \frac{3,95}{3,933^2 + 3,95^2} = 0,127 \text{ о.е.}$$

Аналогичным образом рассчитываются сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$ . Для этого сначала рассчитываются входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $d$ :

$$R_{exd}^{s=1} = R_s + \frac{m_d''}{(i_{sd}'')^2} = 0,0155 + \frac{1,013}{6,24^2} = 0,0415 \text{ о.е.},$$

$$X_{exd}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sd}''}\right)^2 - \left(R_{exd}^{s=1}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{6,24^2} - 0,0415^2} = 0,155 \text{ о.е.}$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $d$  составляет:

$$R_{rmdf}^{s=1} = R_{exd}^{s=1} - R_s = 0,0415 - 0,0155 = 0,026 \text{ о.е.},$$

$$X_{rmdf}^{s=1} = X_{exd}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,155 - 0,0962 = 0,0588 \text{ о.е.}$$

Проводимости и сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  синхронного двигателя определяются по формулам:

$$g_{rd} = \frac{R_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{R_f}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} = \frac{0,026}{0,026^2 + 0,0588^2} - \frac{0,00316}{0,00316^2 + 0,229^2} = 6,23 \text{ о.е.},$$

$$b_{rd} = \frac{X_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{X_{\sigma f}}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} - \frac{1}{X_{md}} =$$

$$= \frac{0,0588}{0,026^2 + 0,0588^2} - \frac{0,229}{0,00316^2 + 0,229^2} - \frac{1}{1,2} = 9,026 \text{ о.е.}$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  на основе известных проводимостей могут быть рассчитаны по формулам:

$$R_{rd} = \frac{g_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} \cdot s = \frac{6,23}{6,23^2 + 9,026^2} \cdot 1 = 0,052 \text{ о.е.},$$

$$X_{ord} = \frac{b_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} = \frac{9,026}{6,23^2 + 9,026^2} = 0,075 \text{ о.е.}$$

Результаты расчёта параметров эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя ДСЗ-2209 показаны в таблице А.10.

Таблица А.10 – Параметры эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя ДСЗ-2209

Тип двигателя	$R_s$ , о.е.	$X_{os}$ , о.е.	$X_{md}$ , о.е.	$X_{mq}$ , о.е.	$R_d$ , о.е.	$X_d$ , о.е.	$R_q$ , о.е.	$X_q$ , о.е.	$R_f$ , о.е.	$X_f$ , о.е.
ДСЗ-2209	0,016	0,096	1,2	0,68	0,052	0,075	0,127	0,127	0,0036	0,229

#### А.2.2 Определение параметров эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4

В таблице А.11 представлены каталожные данные синхронного двигателя СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4, необходимые для расчёта параметров эквивалентной схемы замещения.

Таблица А.11 – Исходные каталожные данные явнополусных синхронных двигателя СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4

Тип двигателя	$I_H, A$	$n, \text{об/мин}$	$\cos\phi_H, \text{о.е.}$	$\eta_H, \text{о.е.}$	$I_{\Pi}, \text{о.е.}$	$M_{\Pi}, \text{о.е.}$	$M_M, \text{о.е.}$	$I_{fH}, A$	$U_{fH}, B$	$T_{f0}, \text{о.е.}$
СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4	351	150	0,9	0,959	5,5	1,85	2,32	250	150	1,45

Синхронное индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  определяются по формулам:

$$X_q = \frac{\sin\phi_H + \cos\phi_H \cdot \sqrt{M_M^2 \eta_H^2 - 1}}{M_M^2 \eta_H^2 \cos^2\phi_H} = \frac{0,436 + 0,9 \cdot \sqrt{2,32^2 \cdot 0,959^2 - 1}}{2,32^2 \cdot 0,959^2 \cdot 0,9^2} = 0,555 \text{ о.е.},$$

$$X_d = 1,67 \cdot X_q = 1,67 \cdot 0,555 = 0,927 \text{ о.е.}$$

Индуктивное сопротивления рассеяния статора  $X_{\sigma s}$  и индуктивные сопротивления ветвей намагничивания по осям  $d$  и  $q$  рассчитываются по следующим выражениям:

$$X_{\sigma s} = \frac{1}{2 \cdot K_i} = \frac{1}{2 \cdot 5,5} = 0,091 \text{ о.е.},$$

$$X_{md} = X_d - X_{\sigma s} = 0,927 - 0,091 = 0,836 \text{ о.е.},$$

$$X_{mq} = X_q - X_{\sigma s} = 0,555 - 0,091 = 0,464 \text{ о.е.}$$

Параметры обмотки возбуждения определяются по её известной постоянной времени  $T_{f0}$ , приняв в качестве исходных соотношения:

$$X_{\sigma f} = \frac{X_{md}}{I_{\Pi} \cdot X_{md} - 1} = \frac{0,836}{5,5 \cdot 0,836 - 1} = 0,127 \text{ о.е.},$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_{f0}} = \frac{0,127 + 0,836}{314 \cdot 1,45} = 0,0021 \text{ о.е.}$$

Активное сопротивление обмотки статора  $R_s$  можно определить, приняв допущение, что потери в меди статора в номинальном режиме составляют 25–30% от общих потерь:

$$R_s \cong 0,25 \cdot (1 - \eta_H) = 0,25 \cdot (1 - 0,959) = 0,01 \text{ о.е.}$$

С учетом несимметрии ротора по осям принимается:



$$m_q'' \cong 1,2 \cdot M_{\Pi} \eta_H \cos \phi_H = 1,2 \cdot 1,85 \cdot 0,959 \cdot 0,9 = 1,916 \text{ о.е.},$$

$$i_{sq}'' = 0,8 \cdot I_{\Pi} = 0,8 \cdot 5,5 = 4,4 \text{ о.е.}$$

Входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $q$  теперь определяются по следующим формулам:

$$R_{exq}^{s=1} = R_s + \frac{m_q''}{(i_{sq}'')^2} = 0,01 + \frac{1,916}{4,4^2} = 0,109 \text{ о.е.},$$

$$X_{exq}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sq}''}\right)^2 - (R_{exq}^{s=1})^2} = \sqrt{\frac{1}{4,4^2} - 0,109^2} = 0,199 \text{ о.е.}$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $q$  рассчитываются по формулам:

$$R_{rmq}^{s=1} = R_{exq}^{s=1} - R_s = 0,109 - 0,01 = 0,099 \text{ о.е.},$$

$$X_{rmq}^{s=1} = X_{exq}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,199 - 0,091 = 0,108 \text{ о.е.}$$

Проводимости пусковой обмотки по оси  $q$  могут быть определены по следующим формулам:

$$g_{rq} = \frac{R_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} = \frac{0,099}{0,099^2 + 0,108^2} = 4,612 \text{ о.е.},$$

$$b_{rq} = \frac{X_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} - \frac{1}{X_{mq}} = \frac{0,108}{0,099^2 + 0,108^2} - \frac{1}{0,464} = 2,876 \text{ о.е.}$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $q$  на основе известных проводимостей рассчитываются по формулам:

$$R_{rq} = \frac{g_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} \cdot S = \frac{4,612}{4,612^2 + 2,876^2} \cdot 1 = 0,156 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma rq} = \frac{b_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} = \frac{2,876}{4,612^2 + 2,876^2} = 0,097 \text{ о.е.}$$

Аналогичным образом рассчитываются сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$ . Для этого сначала рассчитываются входные сопротивления синхронного двигателя по оси  $d$ :

$$R_{\text{exd}}^{s=1} = R_s + \frac{m_d''}{(i_{sd}'')^2} = 0,01 + \frac{1,277}{6,6^2} = 0,039 \text{ о.е.},$$

$$X_{\text{exd}}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sd}''}\right)^2 - \left(R_{\text{exd}}^{s=1}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{6,6^2} - 0,039^2} = 0,152 \text{ о.е.}$$

Общее сопротивление роторной цепи и ветви намагничивания по оси  $d$  составляет:

$$R_{\text{rmdf}}^{s=1} = R_{\text{exd}}^{s=1} - R_s = 0,039 - 0,01 = 0,029 \text{ о.е.},$$

$$X_{\text{rmdf}}^{s=1} = X_{\text{exd}}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,152 - 0,091 = 0,061 \text{ о.е.}$$

Проводимости и сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  синхронного двигателя определяются по формулам:

$$g_{rd} = \frac{R_{\text{rmdf}}^{s=1}}{\left(R_{\text{rmdf}}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{\text{rmdf}}^{s=1}\right)^2} - \frac{R_f}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} = \frac{0,029}{0,029^2 + 0,061^2} - \frac{0,0021}{0,0021^2 + 0,127^2} = 6,227 \text{ о.е.},$$

$$\begin{aligned} b_{rd} &= \frac{X_{\text{rmdf}}^{s=1}}{\left(R_{\text{rmdf}}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{\text{rmdf}}^{s=1}\right)^2} - \frac{X_{\sigma f}}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} - \frac{1}{X_{md}} = \\ &= \frac{0,061}{0,029^2 + 0,061^2} - \frac{0,127}{0,0021^2 + 0,127^2} - \frac{1}{0,836} = 4,303 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Сопротивления пусковой обмотки по оси  $d$  на основе известных проводимостей могут быть рассчитаны по формулам:

$$R_{rd} = \frac{g_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} \cdot s = \frac{6,227}{6,227^2 + 4,303^2} \cdot 1 = 0,109 \text{ о.е.},$$

$$X_{\sigma rd} = \frac{b_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} = \frac{4,303}{6,227^2 + 4,303^2} = 0,075 \text{ о.е.}$$

Результаты расчёта параметров эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4 показаны в таблице А.12.

Таблица А.12 – Параметры эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4

Тип двигателя	$R_s$ , о.е.	$X_{os}$ , о.е.	$X_{md}$ , о.е.	$X_{mq}$ , о.е.	$R_d$ , о.е.	$X_d$ , о.е.	$R_q$ , о.е.	$X_q$ , о.е.	$R_f$ , о.е.	$X_f$ , о.е.
СДМЗ 2-21-67-40УХЛ4	0,01	0,091	0,836	0,464	0,109	0,075	0,156	0,097	0,0021	0,127

### А.3 Определение параметров схемы замещения питающих трансформаторов

В таблице А.13 приведены каталожные данные, необходимые для расчёта параметров эквивалентной схемы замещения питающих трансформаторов.

Таблица А.13 Каталожные данные трансформатора ТДН-16000/110

$S_H$ , кВА	$U_{BH}$ , кВ	$U_{HH}$ , кВ	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$U_K$ , %	$I_X$ , %
16000	115	6,6	58	14	10,5	0,9

Из схемы замещения определяется активное сопротивление первичной обмотки по данным опыта короткого замыкания по формуле:

$$R_K = \frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_H^2} = \frac{58000}{3 \cdot 80,3^2} = 2,9 \text{ Ом},$$

где:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{BH}} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 80,3 \text{ А}.$$

Полное сопротивление короткого замыкания определяется по выражению:

$$Z_K = \frac{U_K \cdot U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot 100} = \frac{10,5 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 80,3 \cdot 100} = 86,8 \text{ Ом}.$$

Зная полное и активное сопротивление короткого замыкания индуктивное сопротивление короткого замыкания рассчитывается по формуле:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{86,8^2 - 2,9^2} = 86,7 \text{ Ом}.$$

Приведенные к одной ступени напряжения активное и индуктивное сопротивления обмоток высшего и низшего напряжения для двухобмоточного трансформатора можно принять одинаковыми. Тогда фазные сопротивления

обмоток высшего и низшего напряжения с учетом коэффициента трансформации рассчитываются по формулам:

$$R_B = \frac{1}{2} \cdot R_K = \frac{1}{2} \cdot 2,9 = 1,45 \text{ Ом},$$

$$R_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_K}{K_T^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2,9}{17,42^2} = 0,0048 \text{ Ом},$$

$$X_B = \frac{1}{2} \cdot X_K = \frac{1}{2} \cdot 86,7 = 43,35 \text{ Ом},$$

$$X_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_K}{K_T^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{86,7}{17,42^2} = 0,071 \text{ Ом},$$

где:  $K_T$  - коэффициент трансформации трансформатора.

Из опыта холостого хода активное сопротивление рассчитывается как:

$$R_X = \frac{\Delta P_X}{3 \cdot \left(\frac{I_X}{100} \cdot I_H\right)^2} = \frac{14000}{3 \cdot \left(\frac{0,9}{100} \cdot 80,3\right)^2} = 8,9 \text{ кОм}.$$

Полное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода определяется по формуле:

$$Z_X = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{I_X}{100} \cdot I_H\right)} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{0,9}{100} \cdot 80,3\right)} = 91,87 \text{ кОм}.$$

Тогда индуктивное сопротивление в режиме холостого года рассчитывается по формуле:

$$X_X = \sqrt{91,87^2 - 8,9^2} = 91,44 \text{ кОм}.$$

Активное сопротивление ветви намагничивания определяется следующим образом:

$$R_\mu = R_X - R_k = 8,9 - 0,00145 = 8,899 \text{ кОм}.$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания определяется как:

$$X_\mu = 91,44 - 0,043 = 91,397 \text{ кОм}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
Испытательный стенд



Рисунок Б.1 – Внешний вид испытательного стенда, моделирующего двухтрансформаторную подстанцию с двигательной нагрузкой

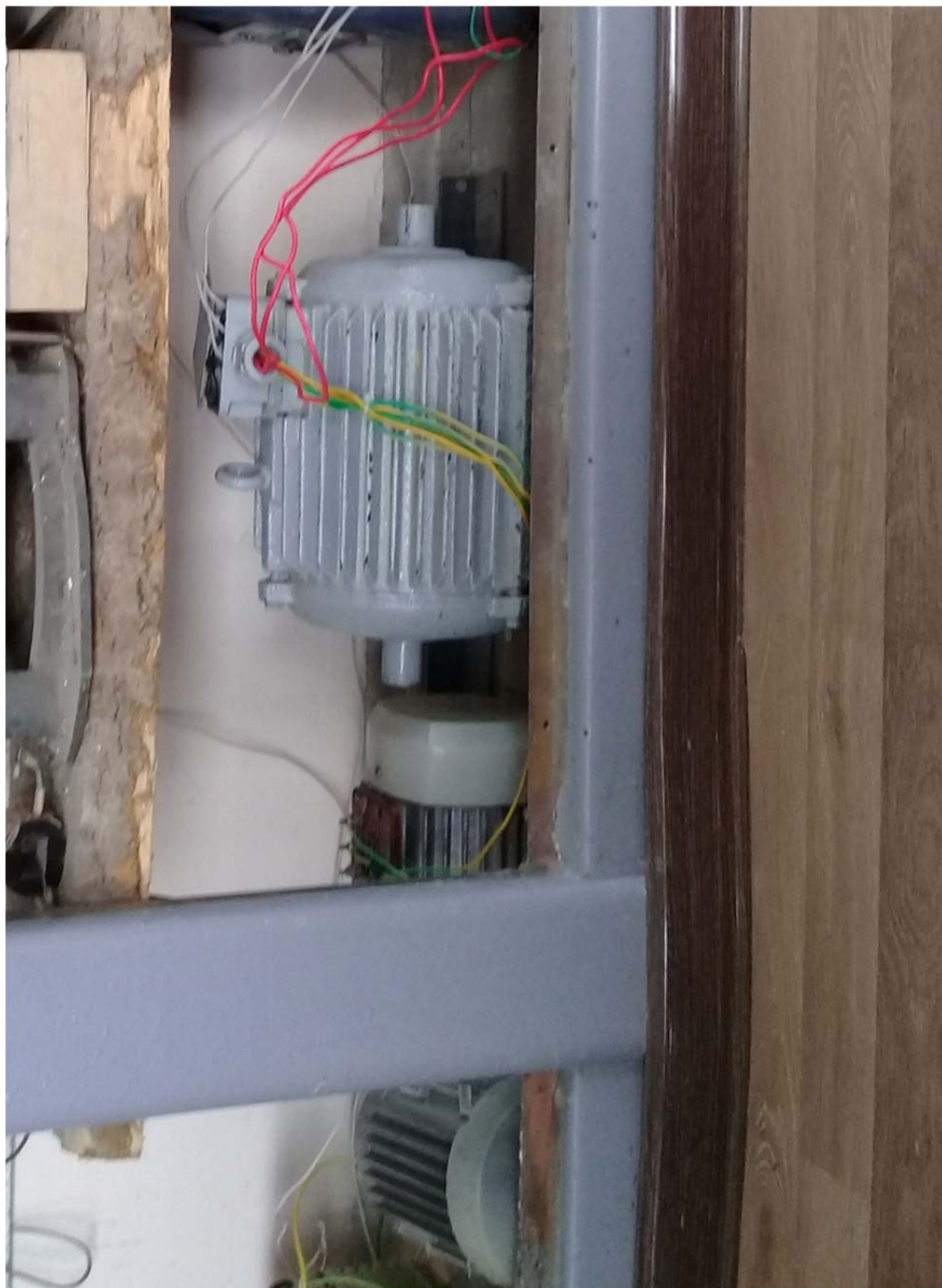


Рисунок Б.2 – Двигательная нагрузка первой секции (асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт)



Рисунок Б.3 – Двигательная нагрузка второй секции (асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт)





Рисунок Б.4 – Магнитный пускатель первой секции, устройства управления магнитным пускателем



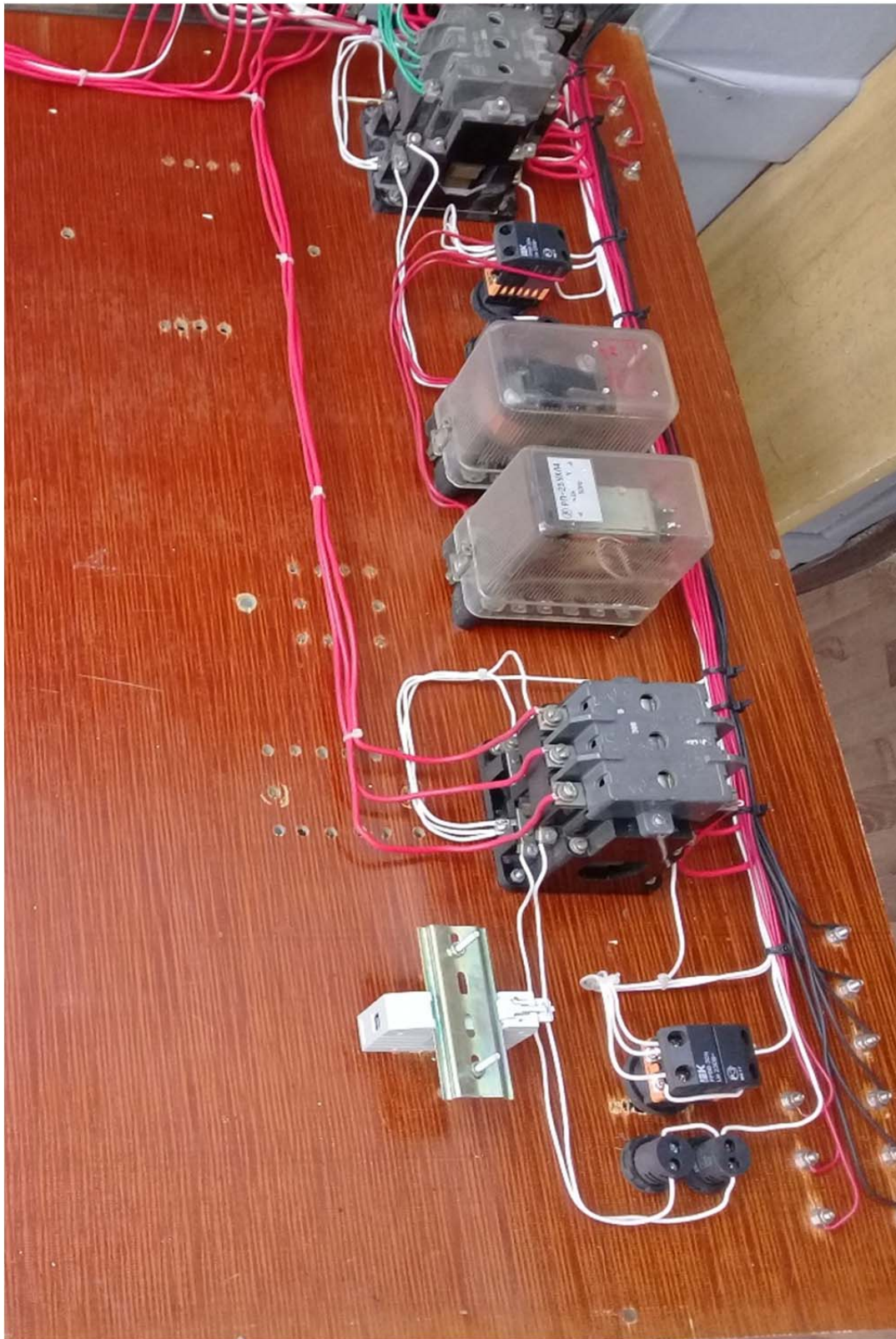


Рисунок Б.5 – Магнитный пускатель второй секции, секционный выключатель и устройства управления пускателями

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
Протокол испытаний

**ПРОТОКОЛ**

испытаний опытного образца микропроцессорного устройства  
быстродействующего АВР на лабораторном стенде кафедры  
«Электрические станции» ГОУВПО «Донецкий национальный  
технический университет» от 18 апреля 2019 года

Результаты испытаний

**Эксперимент №1**

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.

**Качественный результат:** произошло отключение вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму «быстрого» переключения на резервный источник питания.

Время отключения вводного выключателя  $t_{Q1} = 3.432$  с.

Время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.017$  с.

Угол включения  $33^{\circ}$ .

**Эксперимент №2**

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.

**Качественный результат:** произошло отключение вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму синхронного переключения на резервный источник питания.

Время отключения вводного выключателя  $t_{Q1} = 21.95$  с.

Суммарное время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.383$  с.

Угол включения  $350^{\circ}$ .

**Эксперимент №3**

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.



**Качественный результат:** произошло трехфазное короткое замыкание в сети внешнего электроснабжения I секции, отключение устройством БАВР вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму «быстрого» переключения на резервный источник питания.

Время срабатывания устройства БАВР  $t_{\text{БАВР}} = 0.003$  с.

Суммарное время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.138$  с.

Угол включения  $40^\circ$ .

#### Эксперимент №4

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.

**Качественный результат:** произошло двухфазное короткое замыкание в сети внешнего электроснабжения I секции, отключение устройством БАВР вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму «быстрого» переключения на резервный источник питания.

Время срабатывания устройства БАВР  $t_{\text{БАВР}} = 0.003$  с.

Суммарное время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.06$  с.

Угол включения  $39^\circ$ .

#### Эксперимент №5

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.

**Качественный результат:** произошло трехфазное короткое замыкание в сети внешнего электроснабжения I секции, отключение устройством БАВР вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму синхронного переключения на резервный источник питания.

Время срабатывания устройства БАВР  $t_{\text{БАВР}} = 0.003$  с.

Суммарное время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.444$  с.

Угол включения  $342^\circ$ .

#### Эксперимент №6

Нагрузка на секции I: асинхронный двигатель АИР100L8 мощностью 1500 Вт, два асинхронных двигателя АИР63В2 мощностью 550 Вт.

Нагрузка на секции II: асинхронный двигатель АИРС80А4У3 мощностью 1320 Вт.

**Качественный результат:** произошло двухфазное короткое замыкание в сети внешнего электроснабжения I секции, отключение устройством БАВР вводного выключателя I секции и включение секционного выключателя по алгоритму синхронного переключения на резервный источник питания.

Время срабатывания устройства БАВР  $t_{\text{БАВР}} = 0.003$  с.

Суммарное время перерыва питания  $t_{\text{ПЕР}} = 0.609$  с.

Угол включения  $345^{\circ}$ .

Зав. каф. «Электрические станции»



С.Н. Ткаченко

Ст. преп. каф. «Электрические станции»



С.В. Деркачёв

Вед. инж. каф. «Электрические станции»



А.А. Мишлаков

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Документы о внедрении выполненных разработок



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
"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

27.02.19 № 30-11/20

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.024.04 на базе ГОУ ВПО  
«Донецкий национальный технический университет» и  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Деркачёва Сергея Владимировича на тему «Совершенствование методов и устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс кафедры «Электрические станции» Электротехнического факультета ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет».

Результаты диссертационного исследования Деркачёва Сергея Владимировича на тему «Совершенствование методов и устройств автоматического управления переключением на резервное питание двигательной нагрузки в системах электроснабжения» внедрены в учебный процесс кафедры Электрических станций и используются при подготовке бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электрические станции») и магистров по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленности «Электрические станции».

Научно – методические разработки, полученные в рамках диссертационного исследования, задействованы при чтении лекций по дисциплинам: «Элементы системы автоматики» уровня подготовки «бакалавр» и «Интеллектуальные цифровые защиты», «Микропроцессорные защиты и автоматика электрических систем», «Современная релейная защита электродвигателей» уровня подготовки «магистр», а также при выполнении квалификационных работ магистров.

Первый проректор  
к.т.н., доц.

Начальник учебного отдела  
к.т.н., доц.

Заведующий кафедрой «Электрические  
станции», к.т.н., доц.



А.А. Каракозов

Б.В. Гавриленко

С.Н. Ткаченко



УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ТЕ ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект»

РП «Энергия Донбасса»

Журавлев М. Е.

« 15 » марта 2019 г.



г. Донецк

### АКТ

#### **о внедрении микропроцессорного устройства быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР), разработанного в кандидатской диссертации Деркачёва С.В.**

Составлен комиссией: Мельничук Р.А. – главный инженер; члены комиссии: Пазуха Л.М. – начальник Отдела комплексного проектирования №4; Деркачёв С.В. – старший преподаватель кафедры «Электрические станции ГОУВПО «ДонНТУ», о том, что разработанное в рамках диссертационной работы Деркачёва С.В. микропроцессорное устройство быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) планируется к внедрению на ОП «Старобешевская ТЭС» РП «Энергия Донбасса» при проведении модернизации. Основные положения приведены в описании устройства, которое передано предприятию и содержится на 9 страницах.

Председатель комиссии:

Мельничук Р.А.

Члены комиссии:

Пазуха Л.М.

Деркачёв С.В.