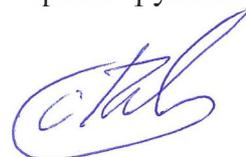


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Червоненко Андрей Павлович

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ
КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ С НАКОПИТЕЛЯМИ
ЭНЕРГИИ**

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Котин Денис Алексеевич

Новосибирск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ.....	13
1.1 Исследование существующих систем электропитания промышленных предприятий	13
1.2 Современные решения при реализации устройств компенсации провалов напряжения	19
1.2.1 Устройство автоматического ввода резерва	19
1.2.2 Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва	24
1.2.3 Устройства компенсации провалов напряжения с накопителями электрической энергии	25
Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА	30
2.1 Описание объекта исследования	30
2.2 Формирование структурных звеньев имитационной модели для исследуемого объекта.....	32
2.2.1 Параметры источника энергии и трансформаторов	32
2.2.2 Параметры нагрузки.....	34
2.2.3 Параметры выключателей автоматического ввода резерва и быстродействующего автоматического ввода резерва	38
2.3 Руководство к пользованию имитационной моделью	40
2.4 Имитационное моделирование системы управления устройством автоматического ввода резерва	42
2.5 Синтез и имитационное моделирование системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва	46
2.5.1 Расчет фазового рассогласования сетей.....	47

2.5.2 Структура системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва	49
2.5.3 Опыт выбега двигателя асинхронного двигателя.....	52
2.5.4 Исследование работы системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва	54
2.5.5 Переключение нагрузки при восстановлении работоспособности основной сети.....	62
2.6 Перспективы использования системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва, построенной на основе опыта выбега асинхронного двигателя	63
Выводы по главе 2.....	69
ГЛАВА 3 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	72
3.1 Анализ типа накопителя электрической энергии и расчет его энергоемкости	72
3.2 Имитационное моделирование алгоритмов управления устройством компенсации провалов напряжения с накопителем электрической энергии	84
3.2.1 Переключение нагрузки на накопитель энергии	84
3.2.2 Переключение нагрузки с накопителя энергии на резервную сеть	95
3.2.3 Переключение нагрузки при восстановлении работоспособности основной сети.....	100
3.3 Оценка технологических параметров насоса при провалах напряжения	100
3.4 Особенности работы системы управления устройством компенсации провалов напряжения в составе частотно-регулируемого электропривода	104
Выводы по главе 3.....	107
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С УСТРОЙСТВОМ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ.....	109
4.1 Разработка конструкторской документации на учебно-исследовательский стенд	109

4.2 Алгоритмы работы логического реле и микроконтроллера	111
4.3 Результаты исследования алгоритмов управления устройством компенсации провалов напряжения в составе учебно-исследовательского стенда	114
4.4 Практические рекомендации о выборе топологии устройства компенсации провалов напряжения.....	117
Выводы по главе 4.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ	135
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ «В» СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ МАТЛАВ ИССЛЕДУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ «Г» ЧЕРТЕЖИ И КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ, СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В практике эксплуатации энергосистем достаточно часто происходят случайные события, инициирующие возмущающие воздействия, которые приводят к значительным изменениям величины и формы питающего напряжения, отклонению его параметров от номинальных или согласованных значений [1, 2]. Нарушения в электроснабжении предприятия могут являться скрытым источником незапланированных простоев технологических установок, а низкое качество электропитания в свою очередь может оказать негативное влияние как на производительность промышленного предприятия [3], так и на ожидаемый срок службы электротехнических и электротехнологических установок в его составе [4].

В настоящее время существуют разные варианты систем, призванных компенсировать провалы напряжения и производить переключение нагрузки в случае возникновения аварии [5]. Данные системы отличаются сложностью реализации и, как следствие, качеством конечного результата. Причем в некоторых случаях природа происхождения провалов напряжения может оказывать влияние на применяемое устройство автоматического ввода резерва [6].

В связи с перечисленным выше, можно констатировать актуальность задачи разработки и исследования технических устройств и алгоритмов управления ими, которые позволили бы компенсировать возмущающие воздействия в системе электроснабжения предприятия, повысить надежность электромеханических систем за счет их безостановочной работы. Предполагаемые научные подходы к разработке позволят обеспечить непрерывность технологических процессов и производств.

Степень разработанности темы исследования

Нужно отметить, что рассматриваемая в диссертационной работе проблема находит отклик среди разных исследователей. Обзор литературы в данном случае представляет собой интерпретацию и обобщение опубликованных по исследуемой теме работ.

Анализ литературы показывает, что и другие исследователи уделяют внимание разработке алгоритмических подходов, связанных с изучением данного вопроса, например, работа Зацепиной В.И., посвящена моделированию провалов напряжения в системах электроснабжения [7, 8]. Для составления имитационной модели автором используется среда *MatLab® Simulink R2014a*. Составленная модель работоспособна, о чем свидетельствуют корректный вид переходных процессов. При разработке модели использовалась библиотека «*Power system*», достаточно часто применяемая многими исследователями.

Работы Секретарева Ю.А. и Меняйкина Д.А. посвящены расчетам последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии [9, 10]. Ими предложена методика расчета надежности электроснабжения электрических сетей, характеризующаяся достаточной степенью точности.

Авторами Федотовым А.И. и Бахтеевым К.Р. рассматриваются вопросы влияния форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения [11]. Для составления имитационной модели используются среда *MatLab® Simulink*, библиотека силовых элементов *SimPowerSystems*. Авторы приводят результаты экспериментов с нагрузкой разной мощности.

В зарубежных источниках вопрос, связанный с перебоями в работе электротехнических комплексов, также является актуальным [12, 13]. Авторы Liao H., Milanovic J., Rodrigues M. предлагают подход к оценке провала напряжения, определяющей его величину независимо от условий работы электротехнической системы, места и характеристик неисправности [14].

Вопрос оценки влияния провалов напряжения на ответственное оборудование достаточно подробно рассматривается в работах Gomez J.C., Morcos M.M. [15].

Ряд отечественных и зарубежных исследователей в своих работах применяют методы искусственного интеллекта для разработки алгоритмов управления и устройств компенсации провалов напряжения (УКПН).

Обобщая анализ литературы, хотелось бы отметить, что не существует универсального решения рассматриваемой проблемы. Так как потребители по своей сути могут по-разному влиять на разрабатываемый алгоритм или устройство. В частности, речь идет о таких потребителях, которые могут оказывать влияние на форму питающего напряжения, что может повлечь за собой перенастройку, казалось бы, совершенного устройства [16].

В соответствии с рассмотренными выше аспектами степени разработанности темы исследования были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование устройств и алгоритмов компенсации провалов напряжения, необходимых для осуществления бесперебойной работы электротехнических комплексов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Выполнить обзор известных технических решений для устройств компенсации провалов напряжения, систем электроснабжения электротехнических комплексов и промышленных предприятий. Обоснованно выбрать для исследования схему электроснабжения и тип УКПН.

2. Осуществить синтез и исследование системы управления устройствами автоматического ввода резерва (АВР) и быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) для потребителей общей установленной мощностью более 500 кВт с вентиляторным характером нагрузки. Предложить алгоритм выбора структуры системы управления и ее параметров для АВР и БАВР.

3. Осуществить синтез и исследование системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва с накопителем электрической энергии. Выбрать тип накопителя энергии для работы в режиме источника бесперебойного питания (ИБП) на время не более 5 секунд и замещением аварийной сети за время не более 100 мс. Оценить отклонения технологических параметров и возможность использования УКПН в составе частотно-регулируемого электропривода объектов ЖКХ.

4. Разработать имитационный учебно-исследовательский стенд

электротехнического комплекса для оценки практической применимости разработанных алгоритмов управления УКПН.

Объектом исследования являются устройства, обеспечивающие бесперебойную работу электротехнических комплексов разного уровня ответственности.

Предметом исследования являются алгоритмы компенсации провалов напряжения.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложен подход к разработке системы управления быстродействующим автоматическим вводом резерва (БАВР) на основе опыта выбега асинхронного двигателя. Предложенный подход отличается от известных тем, что позволяет осуществлять переключение нагрузки с аварийной сети на резервную при частичном или полном отсутствии информации о состоянии ЭДС выбегающей нагрузки. При его расширении методами нечеткой логики и машинного обучения возможно динамическое изменение точности синхронизации аварийной и резервной сети в процессе эксплуатации системы электроснабжения электротехнического комплекса.

2. Предложен и реализован способ переключения аварийной нагрузки, предполагающий промежуточное её подключение к накопителю электрической энергии с последующим переводом на резервную сеть, работающий по алгоритму быстродействующего автоматического ввода резерва. Алгоритм предполагает выполнение всех режимов синхронизации, позволяющих реализовать функцию безударного переключения нагрузки. И отличается от известных отсутствием фазового и амплитудного рассогласований между источниками напряжений в момент перевода нагрузки.

3. Разработан новый подход к составлению имитационных моделей электротехнических комплексов, подразумевающий сочетание нескольких исследуемых топологий, с возможностью выбора конкретного типа исследования внутри одной полновесной структуры. Предложенный подход позволяет

оптимизировать процесс проектирования систем электропитания электроприводов ответственных механизмов, а также уменьшить время на исследование результатов проектирования за счет ускорения процесса вычисления и количества необходимых итераций.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем.

Предложены и инженерно обоснованы критерии выбора устройства компенсации провалов напряжения в зависимости от условий и режимов функционирования технологического процесса, в котором электропривод является основным потребителем электрической энергии. Даны практические рекомендации по выбору УКПН в зависимости от различных факторов: категории электроснабжения потребителя, требований к быстродействию по замещению аварийной сети, времени реакции на аварийную ситуацию и требуемых условий по определению аварии, вхождения или невхождения в состав нагрузки частотно-регулируемого электропривода, чувствительности потребителя к перебоям в системе электроснабжения, режимов работы потребителя, многоступенчатости характера технологического процесса, типа возможных аварийных ситуаций, требуемых темпов восстановления технологических параметров.

Предлагаемые к внедрению алгоритмы безударного переключения нагрузки между источниками питания, в частности накопителем энергии, обеспечивают непревышение броска момента двигателя 150 % от его номинального значения. В том числе предлагаемые алгоритмы обеспечивают неотклонение параметров технологического процесса (напора и расхода насоса) от номинальных значений более, чем на 10 %, а полное время замещения аварийной сети не превышает 100 мс. По описанным выше техническим показателям предлагаемые к внедрению алгоритмы могут находить свое применение в промышленных установках с частотно-регулируемыми ЭП.

Разработан учебно-исследовательский стенд, имитирующий работу энергетической системы и предназначенный для процесса проверки и отладки алгоритмов управления УКПН перед непосредственным внедрением их в систему

электроснабжения реального промышленного объекта.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются положения теории электропривода, методы современной теории автоматического управления, аналитические методы расчета элементов и параметров электротехнических комплексов, основанные на применении аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций, алгоритмы и методы искусственного интеллекта для задач управления. Проверка работоспособности предлагаемых алгоритмов производится методами цифрового моделирования в пакете программ *MatLab® Simulink* и натурными экспериментами.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Последовательность действий при выборе и методика выбора устройства компенсации провалов напряжения, позволяющие однозначно определить тип технического решения на начальном этапе проектирования в зависимости от предполагаемых условий функционирования технологического процесса.

2. Способ реализации, структура и результаты исследований алгоритма переключения нагрузки на резервную сеть с использованием БАПР, система управления которого построена на основании данных опыта выбега асинхронного двигателя. Предложенный способ позволяет обеспечить функционирование электротехнического комплекса в условиях частичного или полного отсутствия информации об объекте управления.

3. Способ реализации, структура и результаты исследований алгоритма переключения нагрузки между источниками питания с использованием БАПР, включающего в свою структуру накопитель электрической энергии. Предложенный способ позволяет обеспечить согласование параметров всех источников питания электротехнического комплекса и реализовать функцию антидребезга нагрузки.

4. Подходы к проектированию учебно-исследовательского стенда, позволяющие выполнять проверку и отладку разрабатываемых алгоритмов управления УКПН.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, приняты к применению по следующим направлениям: разработка и производство системы накопления энергии (СНЭ) и проектирование устройств стабилизации постоянного напряжения (УСПН) ООО «Системы Постоянного Тока», в качестве материалов для организации работ в рамках работы с учебными заведениями в России и Республике Беларусь, развития учебных и испытательных лабораторий компании *IEK GROUP*, а также используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) (Приложение Б). Организация процесса обучения может быть связана как с доработкой и усовершенствованием учебно-исследовательского стенда и доведением его до готового устройства, что подходит как для проектной деятельности студентов, так и для непосредственного проведения практических занятий.

Результаты работы также были использованы при выполнении хоздоговорной НИР «Разработка и исследование цифровых моделей для анализа эффективности существующих и вновь проектируемых технических решений по компенсации провалов напряжения» с ООО «Системы накопления энергии», 2019 г.

Степень достоверности работы. Полученные в ходе выполнения исследования теоретические и научно-прикладные результаты подтверждаются корректной постановкой задач, применением широко известных допущений, результатами вычислительных экспериментов на имитационной модели, выполненных в специализированном для этих задач пакете прикладных программ, а также результатами научно-исследовательских работ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях по итогам научной работы: XIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», г. Оренбург, 2022 г.; XXIII Всероссийской Конференции по Автоматизированному Электроприводу (АЭП 2022), г. Тула, 2022 г.; XIII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии

в электротехнике и электроэнергетике», г. Чебоксары, 2022 г.; 10 International conference on electrical power drives systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018 г.; XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2017 г.; 25-ой Межвузовской (Региональной) научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири», г. Новосибирск, 2017 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 10 печатных работ, 3 из которых – в журналах из перечня ВАК, 1 – в трудах научных конференций, индексируемых в наукометрических базах *Scopus*, *Web of Science*, 5 – в материалах и трудах всероссийских и международных научных конференций.

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач исследования, выполнении расчетов, разработке методик структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления, исследовании синтезированных алгоритмов методом численного моделирования, проведении натуральных экспериментов, анализе полученных результатов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автором осуществлена постановка задач исследования, выбор методов их решения и анализ результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Она содержит 152 стр. основного текста, 79 рисунков, 14 таблиц и библиографический список из 73 наименований.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Согласно ГОСТ 32144 различают следующие случайные события:

- Прерывание напряжения – ситуация, при которой напряжение в точке передачи электрической энергии меньше 5 % опорного напряжения (во всех фазах);
- Провал напряжения – временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения (принимают равным 90 % опорного напряжения).

Провалы напряжения в сети – существенная проблема объектов, чья работа зависит от бесперебойного питания электрических систем, особенно если к работе данных объектов предъявляются повышенные требования (литейное производство, нефтедобывающая отрасль, сфера ЖКХ и т.д.). Провалы напряжений на такого рода объектах чреваты поломкой электрических приборов и резким снижением эффективности производства. Несмотря на распространенность проблемы, экономические последствия данного явления часто остаются недооцененными.

1.1 Исследование существующих систем электропитания промышленных предприятий

Электроснабжение от энергетической системы можно реализовать несколькими вариантами (рисунок 1.1). Первый вариант связан с глубоким вводом двойной магистрали напряжением 35...220 кВ на территорию предприятия с подключением отпайкой от обеих цепей нескольких пар трансформаторов. Второй вариант – одна мощная главная понизительная подстанция на все предприятие. Первую схему (см. рисунок 1.1, а) целесообразно применять на больших предприятиях, занимающих внушительные территории. При этом данные предприятия должны располагать площадями для прохождения линии напряжением 35...220 кВ. На предприятиях средней мощности с концентрированным расположением нагрузок используется вторая схема (см.

рисунок 1.1, б). Выбор основного электрооборудования, проведение расчетов, выполнение прочих чертежей выполняется на основании данных схем, являющихся основными электротехническими чертежами проекта [17].

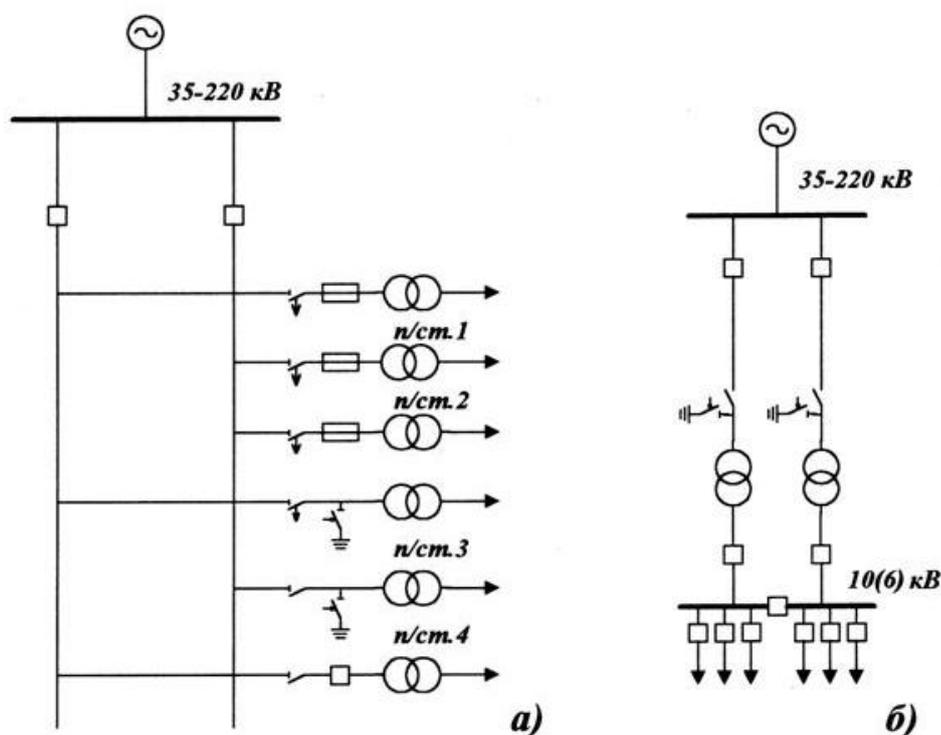


Рисунок 1.1 – Схемы внешнего электроснабжения для крупных (а) и средних (б) предприятий

Следует отметить, что напряжение 110 кВ часто используется для электроснабжения предприятий от энергосистемы [18]. Распределительная сеть 6 (10) кВ (редко 35 кВ) – это внутренняя сеть предприятия, которая используется для передачи энергии от шин основных понижающих подстанций к распределительным и трансформаторным пунктам по токопроводам, кабелям и воздушным линиям электропередачи.

На рисунке 1.2 (а) приведена одиночная схема, которая применяется для третьей категории потребителей. Особенность этой схемы заключается в том, что она требует меньшего количества переключателей и проводов. Отсутствие канала

аварийного питания является недостатком этой схемы, особенно если речь идет о повреждении линии.

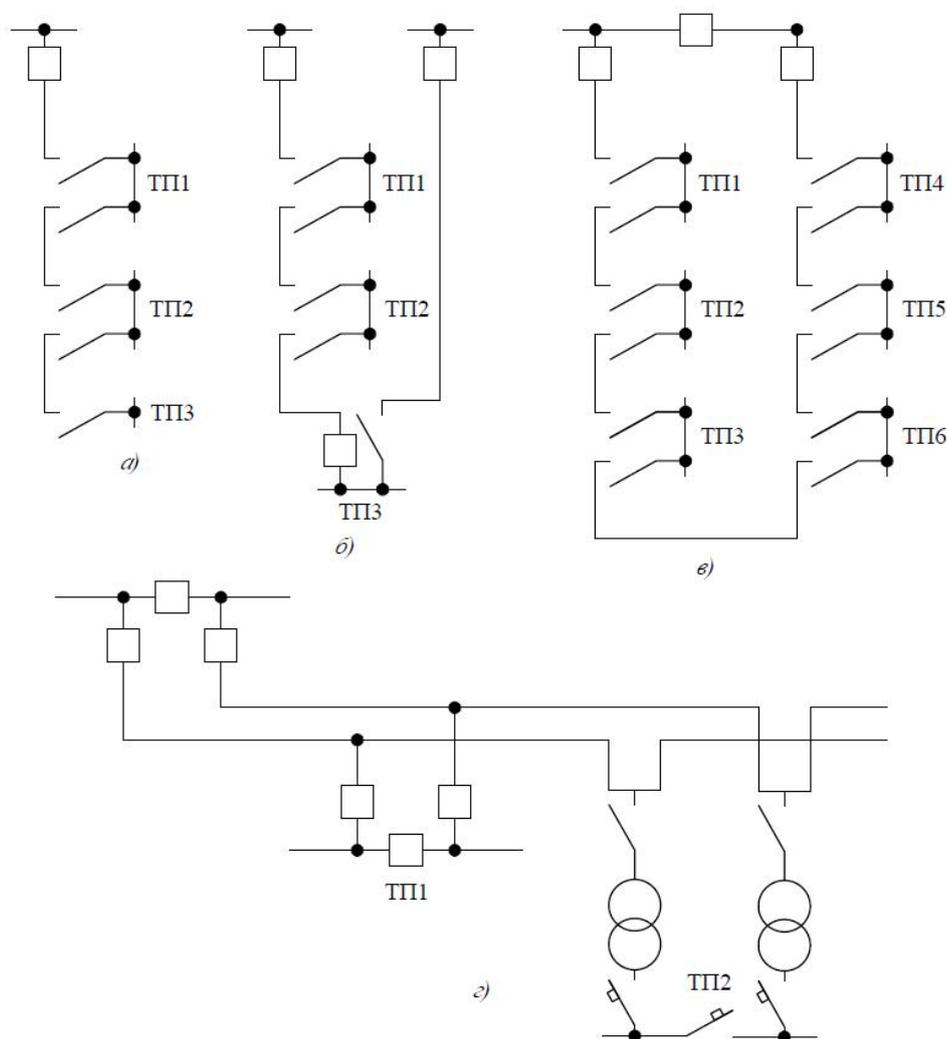


Рисунок 1.2 – Магистральные схемы электроснабжения: а – одиночная; б – сквозная с двусторонним питанием; в – кольцевая; г – двойная; ТП1...ТП6 – трансформаторные подстанции

Сквозная схема с двусторонним питанием, приведенная на рисунке 1.2 (б), отличается повышенной надежностью. Схема предназначена для питания потребителей второй категории.

На рисунке 1.2 (в) приведена кольцевая схема. Она реализуется путем соединения двух отдельных сетей мостом при напряжении 6 (10) кВ. Эта схема

используется при подключении потребителей второй категории по воздушным линиям электропередачи.

Двойная схема является достаточно надежной (рисунок 1.2, г). Это связано с тем, что в любой аварийной ситуации в трансформаторе или на линии возможно питание потребителей по второй магистрали. Это относится и к потребителям первой категории.

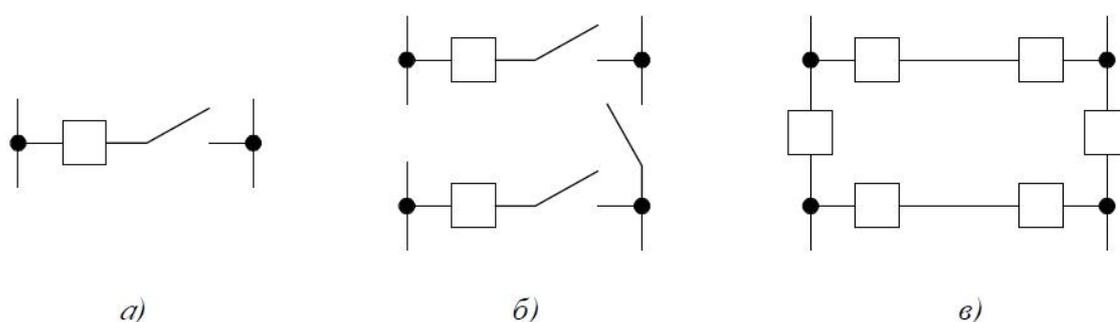


Рисунок 1.3 – Радиальные схемы электроснабжения для питания потребителей первой (в), второй (б) и третьей (а) категорий надежности электроснабжения

Радиальные схемы используются для питания мощных электродвигателей и сосредоточенных нагрузок (рисунок 1.3) [19]. Двухцепные радиальные схемы используются для потребителей второй и первой категорий. Одноцепные схемы, как правило, предназначены для потребителей третьей категории. По сравнению с магистральными радиальные схемы имеют несколько преимуществ – они более надежны и их легче автоматизировать.

Радиальная схема (рисунок 1.3, а) используется для потребителей третьей категории. С определенными изменениями эта схема может быть использована для потребителей второй категории (при встраивании устройства автоматического повторного включения (АПВ) воздушной линии электропередачи). В случае добавления резервных источников питания система может быть использована для потребителей первой категории.

Радиальная схема (рисунок 1.3, б) используется для потребителей второй категории. В некоторых случаях ее можно использовать для потребителей первой категории.

Радиальная схема (рисунок 1.3, в) используется для потребителей первой категории. В случае потери напряжения на одном из участков шины электропитание потребителя восстанавливается путем автоматического включения секционного выключателя.

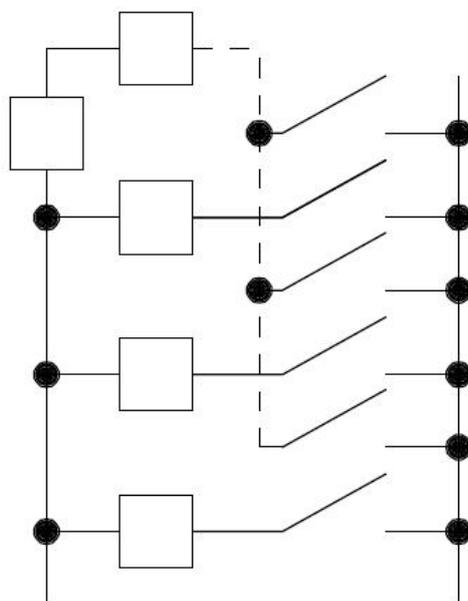


Рисунок 1.4 – Смешанная схема электроснабжения

Построение смешанной схемы осуществляется по радиальным линиям. На рисунке 1.4 пунктирными линиями показано построение резервной линии электропередачи по сквозной магистрали.

Секционные аппараты на приведенных выше схемах находятся в выключенном состоянии при нормальной работе. Смешанные схемы имеют элементы радиальных и магистральных схем.

Металлургические заводы с полным производственным циклом [20] имеют иную систему электроснабжения. Питание может осуществляться от ближайшей электрической сети [21] через подстанцию напряжением 220 или 110 кВ и от

заводской местной ТЭЦ (рисунок 1.5). Заводская местная тепловая электростанция обычно подключается к электросети 220 кВ (110 кВ).

При разработке проекта электроснабжения металлургического завода необходимо учитывать, что энергетическая система должна воспринимать ударные нагрузки прокатных станов. Для обеспечения минимально допустимых колебаний напряжения в питающей сети 220 кВ (110 кВ) электрическая сеть должна быть мощной.

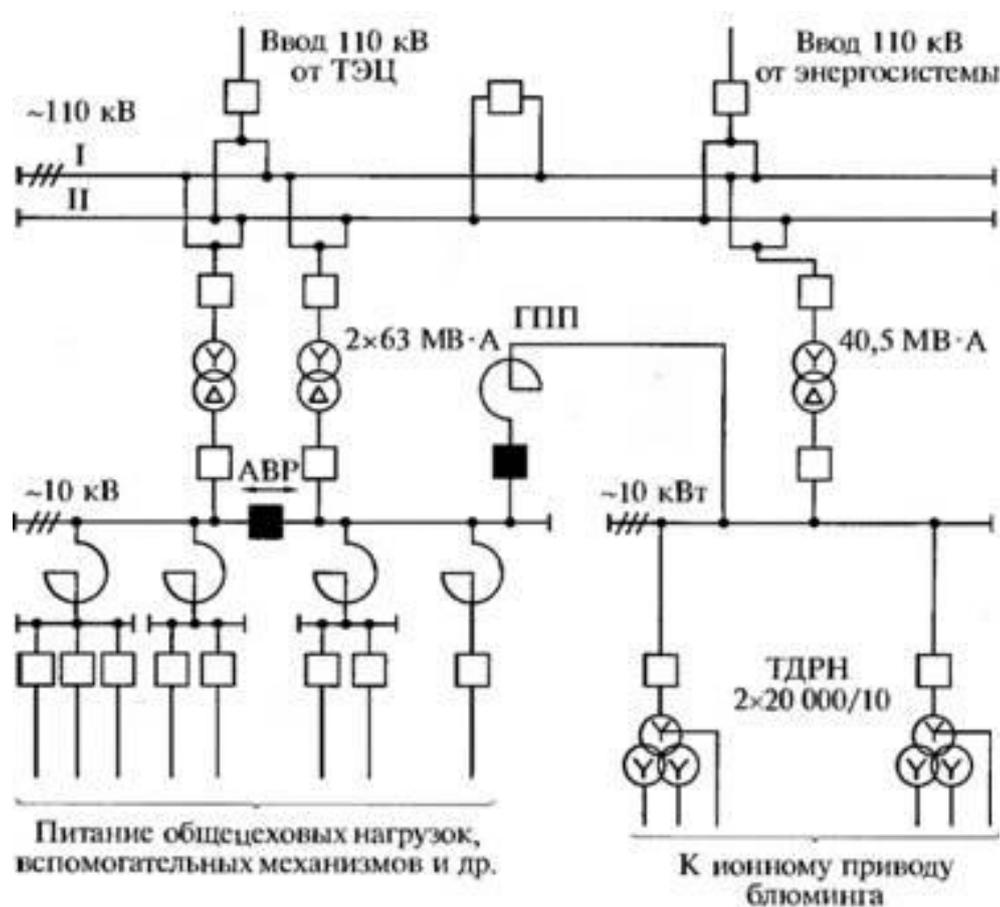


Рисунок 1.5 – Структурная схема электроснабжения блюминга

Из приведенных схем чаще используются системы с разделенными обмотками трансформаторов основных понижающих подстанций и двойными дросселями (особенно для производств средней мощности). Подключение общей нагрузки к одной секции шин оказывает влияние на колебания напряжения. На секциях с нагрузкой, которая носит спокойный характер, под воздействием

нагрузки резкопеременной на других секциях колебания напряжения будут меньше [22].

1.2 Современные решения при реализации устройств компенсации провалов напряжения

1.2.1 Устройство автоматического ввода резерва

Автоматический ввод резерва (АВР) – автоматическое устройство, которое осуществляет автоматическое включение резервных источников питания [23]. При нарушениях параметров в основной сети устройство АВР осуществляет переключение нагрузки на резерв. Резервным источником при этом может выступать ЛЭП, дизель-генераторная установка или бензиновый генератор, накопитель энергии. В большинстве случаев наличие резервного источника у потребителей первой категории является обязательным условием (оснащение независимыми источниками питания) [24]. Нужно отметить, что в ситуациях, где потребитель относится к первой особой категории, существует требование доступности трех и более резервных источников питания.

Главная функция, которую выполняет АВР, сводится к обеспечению бесперебойной работы потребителей. Для выполнения данной задачи устройству АВР необходимо отслеживать состояние линии, осуществляющей питание. При обнаружении аварийной ситуации система АВР осуществляет переключение нагрузки на резервный ввод. Разумеется, что данный процесс должен осуществляться с максимальным быстродействием. Важным условием выступает однократность осуществляемого переключения, связанное с запретом на повторные срабатывания в случае однотипных неисправностей. Нужно отметить, что при этом отключение основной сети должно осуществляться до включения резервной линии. О ходе процесса переключения система АВР информирует при помощи индикаторов [25].

Значения рабочего напряжения задаются пользователем. При любых несоответствиях с заданными значениями автоматика отправляет команду на

переключение ввода. Такими несоответствиями могут выступать короткое замыкание, обрыв сети, падение напряжения, перекос фаз или перенапряжение. При этом система АВР следит за выполнением части дополнительных функций [26]. Как указывалось выше, на контролируемом участке запрещается наличие неустранимых неисправностей. В таком случае включение резервного источника лишается смысла, а в определенных случаях может привести к созданию аварии. Система АВР должна констатировать включение основного ввода, так как пропаша напряжения может быть связана с намеренным отключением питания. Перед тем как осуществить переключение нагрузки, система АВР должна проверить готовность резервной линии путем наличия на ней напряжения.

Отключение системой АВР основного ввода и подключение резервного источника произойдет только в том случае, если все условия выполнены. После этого работа системы АВР может осуществляться по двум схемам. Работа будет осуществляться от резервного источника, если оба ввода равноценны. Если же это не предусматривается, то при восстановлении напряжения на основном вводе произойдет обратное переключение.

Технически систему АВР составляют коммутационная и логическая части [27]. Первая составляющая осуществляет переключение на практике, то есть выполняет механическую функцию, а вторая отвечает за принятие решений. Стоит рассматривать составляющие АВР более подробно, так как задач у системы управления (СУ) несколько. Как в основной, так и в резервной сети установлены измерительные датчики. Для задания нижней и верхней границ рабочего напряжения уставка измерительной части регулируется. Измерительная часть постоянно контролирует тот или иной ввод.

Выдержка срабатывания контроллера логической части также регулируется [28]. Цепь однократности, реализованная с помощью двухпозиционного реле, также относится к логической части. С помощью указательных реле реализована еще одна важная часть АВР – сигнальная или индикаторная часть. Информирова обо всех неисправностях и изменениях в системе, она выполняет защитную функцию АВР.

Силовая часть может быть реализована на автоматических выключателях или контакторах. Вне зависимости от решения должна быть реализована блокировка одновременного включения обеих сетей. Это может быть достигнуто при применении механической и электронной блокировок.

Выбор корректной схемы – это непростой и важный момент в построении системы АВР. В данном случае всё определяется реальной задачей. Тем не менее разработаны стандартные схемы, отличающиеся числом вводов и типом используемого резервного источника.

На рисунке 1.6 представлена схема автоматического ввода резерва на два ввода. Это простейший способ построения схемы автоматического ввода резерва, для реализации которой требуются два автоматических выключателя или контактора. Для построения схемы в трехфазной сети необходимо реле контроля фаз. Принцип работы автоматического ввода резерва на два ввода не отличается высокой сложностью. Электрический ток протекает в штатной ситуации через один из вводов. При возникновении аварии контакт на данном вводе разорвется и замкнется на втором. При восстановлении напряжения на первом вводе происходит обратное действие. Статус приоритета первого ввода – особенность построения данной системы.

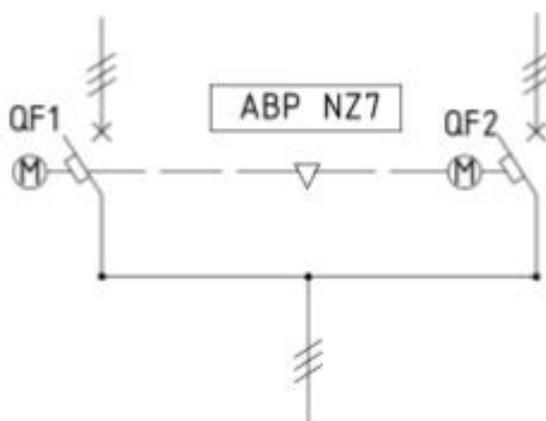


Рисунок 1.6 – Схема автоматического ввода резерва на 2 ввода

На рисунке 1.7 представлена схема автоматического ввода резерва на два ввода с секционированием. Данное исполнение применимо в тех случаях, когда

имеется распределение питания нагрузки между двумя различными сетями. Первый ввод питает одну секцию, а второй ввод – другую.

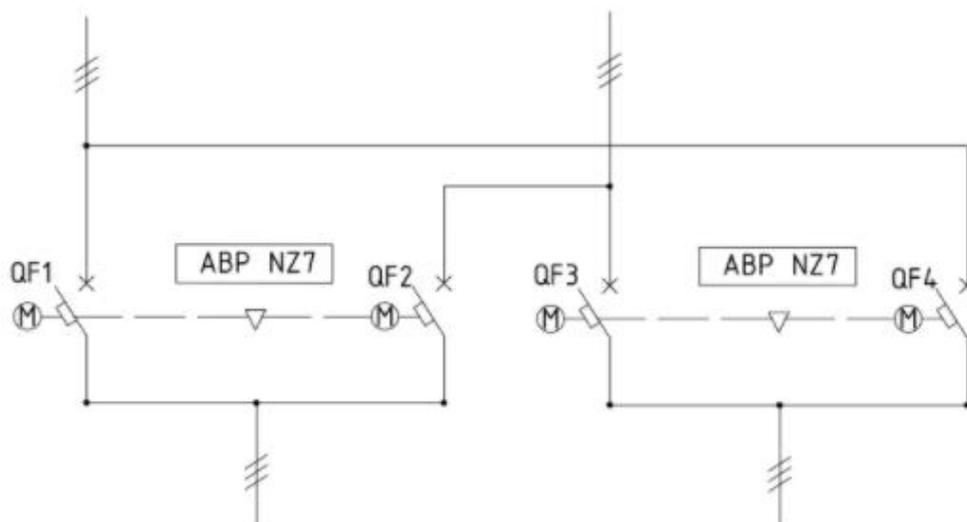


Рисунок 1.7 – Схема автоматического ввода резерва на два ввода с секционированием

Отличительная особенность данной схемы – равнозначность обоих вводов. Для построения системы применяются секционный выключатель и два автоматических выключателя. При срабатывании автомата на первом вводе происходит запитывание отключенной секции через секционный выключатель от второго ввода. Каждая из секций будет питаться от своего ввода при возобновлении штатной работы.

На рисунке 1.8 представлена схема автоматического ввода резерва на три ввода. При возникновении аварийной ситуации на основном вводе осуществляется переключение на второй ввод. В случае, если данный ввод обесточен, переключение происходит на третий ввод. Построение данной схемы автоматического ввода резерва возможно по двум вариантам, а определяющим является тип используемых источников питания. Например, при использовании генератора и двух независимых линий схема будет состоять из одного резервного и двух равнозначных вводов. Если же используются два генератора и одна линия,

то схема будет состоять из двух последовательных резервов и одного основного ввода [29].

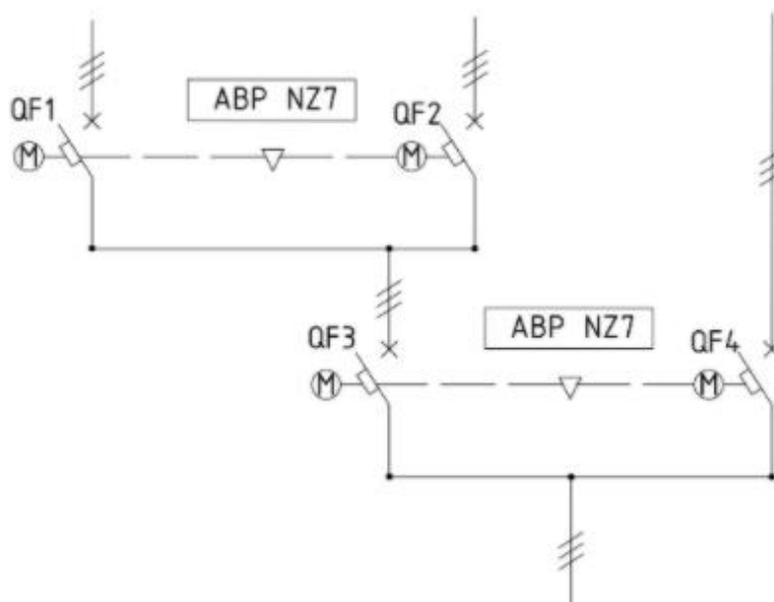


Рисунок 1.8 – Схема автоматического ввода резерва на 3 ввода

Выше описанная система может иметь разновидности, например, схему автоматического ввода резерва на три ввода с отложенным запуском. Особенностью схемы является включение программируемого логического контроллера, позволяющего на определенное время сделать пуск генератора отложенным. Связанно это с нестабильностью выдаваемого напряжения генератором в начале работы. Тем самым отложенный запуск способствует выходу генератора на штатный режим работы.

В случаях, когда резервным источником являются несколько дизель-генераторных установок с большой мощностью, может применяться схема автоматического ввода резерва на четыре ввода с каскадным запуском. Под каскадным запуском в данном случае подразумевается последовательный пуск генераторов один за другим с определенным временным интервалом. Связано это с тем, что синхронный пуск всех генераторов может вызвать большие пусковые токи и, как следствие, просадку напряжения. В конечном счете не все генераторы смогут выйти на рабочий режим, и на работу потребителей будет оказано

негативное воздействие [30].

1.2.2 Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва

Быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР) – система противоаварийной автоматики. В функции БАВР входит обеспечение двухстороннего действия на коммутацию выключателей основной и резервной сети и на включение секционного выключателя (рисунок 1.9). Работа системы быстродействующего автоматического ввода резерва возможна для различных типов аварийных ситуаций. С одной стороны, это могут быть разные типы коротких замыканий, с другой – отключение питающей сети. Комплекс быстродействующего автоматического ввода резерва может применяться как на двухсекционных подстанциях, так и для распределительных устройств с одной или тремя секциями [31].

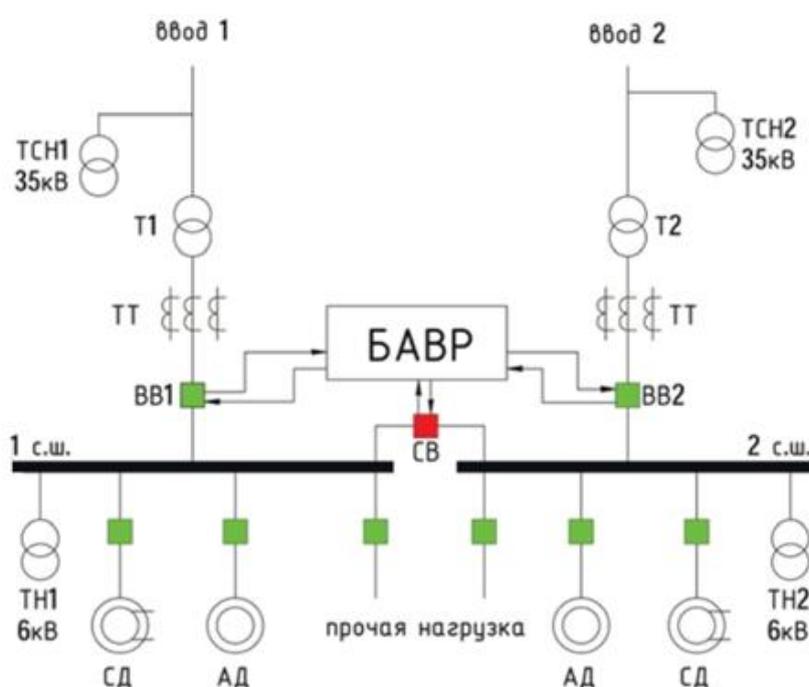


Рисунок 1.9 – Система БАВР

Преимущества быстродействующего автоматического ввода резерва состоят в следующем:

- Минимальное время реагирования на аварийную ситуацию 5-12 мс;
- Минимальное время переключения нагрузки. Полное время переключения нагрузки на резервную сеть зависит от типа вакуумных (элегазовых) выключателей: например, для выключателей типа *Shell Q* (Таврида Электрик) полное время переключения составляет 26÷34 мс;
 - Безопасное и непрерывное питание нагрузки благодаря быстросрабатывающему вводу резервного электропитания;
 - Переключение нагрузки на резервный источник питания происходит всегда с контролем синфазности сетей;
 - При работе БАВР в отличие от типового АВР синхронные двигатели не требуют ресинхронизации и гашения поля, не выпадают из синхронизма;
 - Пусковые токи двигателей, при переключении с аварийной сети на резервную, не превышают $(2\div2,5)\cdot I_n$, что благоприятно сказывается на длительности использования механизма и двигателя;
 - Малая длительность переходных процессов после срабатывания устройства;
 - Устройство может работать при несимметричных коротких замыканиях в энергетической системе, составляющих большую долю всех происходящих коротких замыканий;
 - Обеспечивает значения остаточных напряжений не менее $0,9\cdot U_{ном}$ (время выбега на короткое замыкание уменьшается до 14÷20 мс);
 - Работает с различными элегазовыми и/или вакуумными выключателями [32].

1.2.3 Устройства компенсации провалов напряжения с накопителями электрической энергии

Недостатком типовых систем автоматического ввода резерва и автоматического повторного включения, применяющихся для восстановления питания нагрузки, является длительное время срабатывания. В конечном счете при

провалах напряжения может быть нарушена работа нагрузки, чувствительной к перебоям в сети. По причине сбоев в работе отдельных чувствительных потребителей следуют нарушения функционирования технологических комплексов автоматизированных производств. Нарушение условий производственного процесса влечет за собой недоотпуск и низкое качество продукции. Для многих предприятий убытки от перебоев в сетях, учитывая повторный запуск производственных процессов, могут быть сравнимы с убытками от длительного отсутствия питания.

В настоящее время актуальным вопросом является применение на практике различного рода накопителей энергии [33]. Ранее данные типы источников питания использовали как для незначительной выработки энергии, так и в качестве источников бесперебойного питания (ИБП) маломощных потребителей. В последнее время накопители выступают главной составляющей активно-адаптивных систем. Ключевым моментом, оказывающим влияние на изучение использования накопителей энергии в энергетических системах, является стремление к наращиванию распределенной генерации за счет альтернативных источников энергии (использование ветрогенераторов и выработка электроэнергии за счет энергии солнца). Большое влияние также оказывает финансовая составляющая – повышенная стоимость электрической энергии в часы большой загрузки сети. Увеличиваются требования к безопасности электроснабжения. Главная особенность накопителей, связанная с выработкой энергии и дальнейшей ее отдачей в требуемый временной отрезок, является основным смыслом для проектирования современных концепций оптимального управления энергетическими объектами [34].

Основные области использования накопителей связаны со следующими аспектами:

1. Сглаживание графиков потребления в сети (аккумуляция электроэнергии во время наличия излишней энергии и генерирование в сеть во время ее недостатка);
2. Обеспечение повышения границ устойчивости в сочетании с

системами, используемыми для управления потоком мощности и компенсацией реактивной мощности в энергосистемах;

3. Обеспечение непрерывного электроснабжения ответственных объектов, собственных потребностей подстанций и электростанций;

4. Сглаживание колебаний мощности, управление работой малоинерционных рассредоточенных источников питания.

5. Повышение стабильности и показателей качества энергосистем, обеспечение внедрения возобновляемых источников электрической энергии в системы электроснабжения.

Для всех перечисленных выше аспектов имеет значение способность накопителя аккумулировать энергию и хранить ее в течение определенного времени, то есть его энергоемкость. Также большое значение имеет мощность, выдаваемая в определенный временной интервал в течение разряда накопителя. Определяющими свойствами накопителя также выступают коэффициент полезного действия и его время разряда, то есть способность отдавать необходимую мощность в определенный временной отрезок.

Конденсаторы, являющиеся одним из используемых типов накопителей энергии, со временем были заменены аккумуляторными батареями. Эта замена связана со способностью аккумуляторов накапливать электрическую энергию в гораздо больших объемах. Немаловажным фактором является незначительное изменение напряжения на выходе аккумулятора при его разрядке. Таким образом, в использовании стабилизатора напряжения либо нет необходимости, либо его конструкция будет очень простой [35].

Также одним из главных отличий аккумуляторов и конденсаторов является принцип накопления заряда. Конденсаторы накапливают заряд в его непосредственном виде, а аккумуляторные батареи электроэнергию преобразуют в энергию химическую, хранят ее и в случае выдачи выполняют обратное преобразование. В результате данных преобразований происходит частичная потеря энергии. По этой причине КПД аккумуляторов может достигать значения 90 %, при этом КПД конденсаторов может доходить до 99 %.

Если проанализировать имеющиеся на сегодняшний день типы накопителей энергии, то можно сделать вывод, что наиболее совершенным вариантом для нивелирования провалов напряжения является применение суперконденсаторов. У суперконденсатора в роли обкладок выступает двойной электрический слой на линии раздела электролита и электрода [36].

Применение суперконденсаторов в качестве накопителей энергии в энергосистемах для компенсации провалов напряжения помогает экономить существенные материальные ресурсы. К примеру, провал напряжения глубиной в 10 % от номинала и продолжительностью 0,1 секунд может принести среднему промышленному предприятию убытки в несколько миллионов рублей. Благодаря использованию суперконденсаторов для компенсации провалов напряжения годовая экономия может достигать значительных показателей.

В результате можно сделать вывод о том, что использование суперконденсаторов может являться наиболее актуальным решением проблем, связанных с провалами напряжения [37].

Выводы по главе 1

В главе произведен обзор существующих систем электропитания промышленных предприятий, а также имеющихся на сегодняшний день устройств компенсации провалов напряжения. Обобщенно рассматриваются особенности каждого из устройств. Особое внимание уделяется устройствам компенсации провалов напряжения с накопителями электрической энергии.

В качестве объекта для проведения дальнейших исследований выбрана система электроснабжения предприятия, использующая напряжение энергетической системы 110 кВ, что соответствует предприятию средней мощности. В исследуемую модель закладываются понижающие трансформаторные подстанции напряжением 110/10 кВ и 10/6 кВ. Внутренней сетью предприятия является распределительная электросеть напряжением 6 кВ, питающая нагрузку в виде асинхронного двигателя. В качестве резервной сети при

составлении модели выбрана аналогичная энергосистема.

В главе подробно рассмотрен вопрос построения системы автоматического ввода резерва. Исследование имитационной модели, содержащей систему АВР приводится в главе 2 настоящей диссертации.

В главе рассматривается назначение системы быстродействующего АВР, приводятся преимущества данной системы. Безусловно, возможности и сложность исполнения системы влияют на конечную стоимость устройства и при принятии решения о необходимости его использования нужно предварительно проводить многокритериальный анализ.

В главе рассмотрена роль использования накопителей энергии в вопросах построения систем компенсации провалов напряжения, в частности обсуждается работа ответственных потребителей. Отмечаются возможности использования суперконденсаторов для решения задач борьбы с провалами напряжения.

ГЛАВА 2 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА

2.1 Описание объекта исследования

В данной работе в качестве объекта исследования будет рассмотрена работа теплоэлектростанции (ТЭС) – разновидности тепловой электростанции, которая не только производит электроэнергию, но и выступает в роли источника энергии тепловых сетей – снабжение горячей водой (паром), предназначенной для систем центрального отопления прилежащих населенных пунктов и общебытового применения [38].

Цикл работы теплоэлектростанции начинается с совместного поступления в топку разогретого воздуха, играющего роль окислителя, и топлива, которым как правило является измельченный уголь. За счет процесса горения угля вода, подающаяся котел, преобразуется в пар, который далее поступает на паровую турбину под давлением. Ротор генератора приводится в движение за счет вращающейся от пара турбины, тем самым осуществляя преобразование энергии механической в электрическую. В дальнейшем пар, который в значительной степени снизил собственное давление и температуру поступает в конденсатор, где он вновь преобразуется в воду. Далее конденсатный насос перемещает ее в регенеративные нагреватели (тип нагревателя – смешивающий или поверхностный, схема включения, параметры пара и воды оказывают влияние на расход пара), а затем перекачивает в деаэратор. Происходит очистка воды от вызывающих коррозию кислорода и углекислого газа. В дальнейшем вода снова нагревается от пара и возвращается в котел [39].

Можно отметить, что весь технологический процесс достаточно трудоемок и малейшие провалы напряжений грозят полной его остановке и как следствие не скорому запуску. Поэтому к данному объекту предъявляются повышенные требования.

Обобщенная электрическая схема объекта исследования приведена на рисунке 2.1.

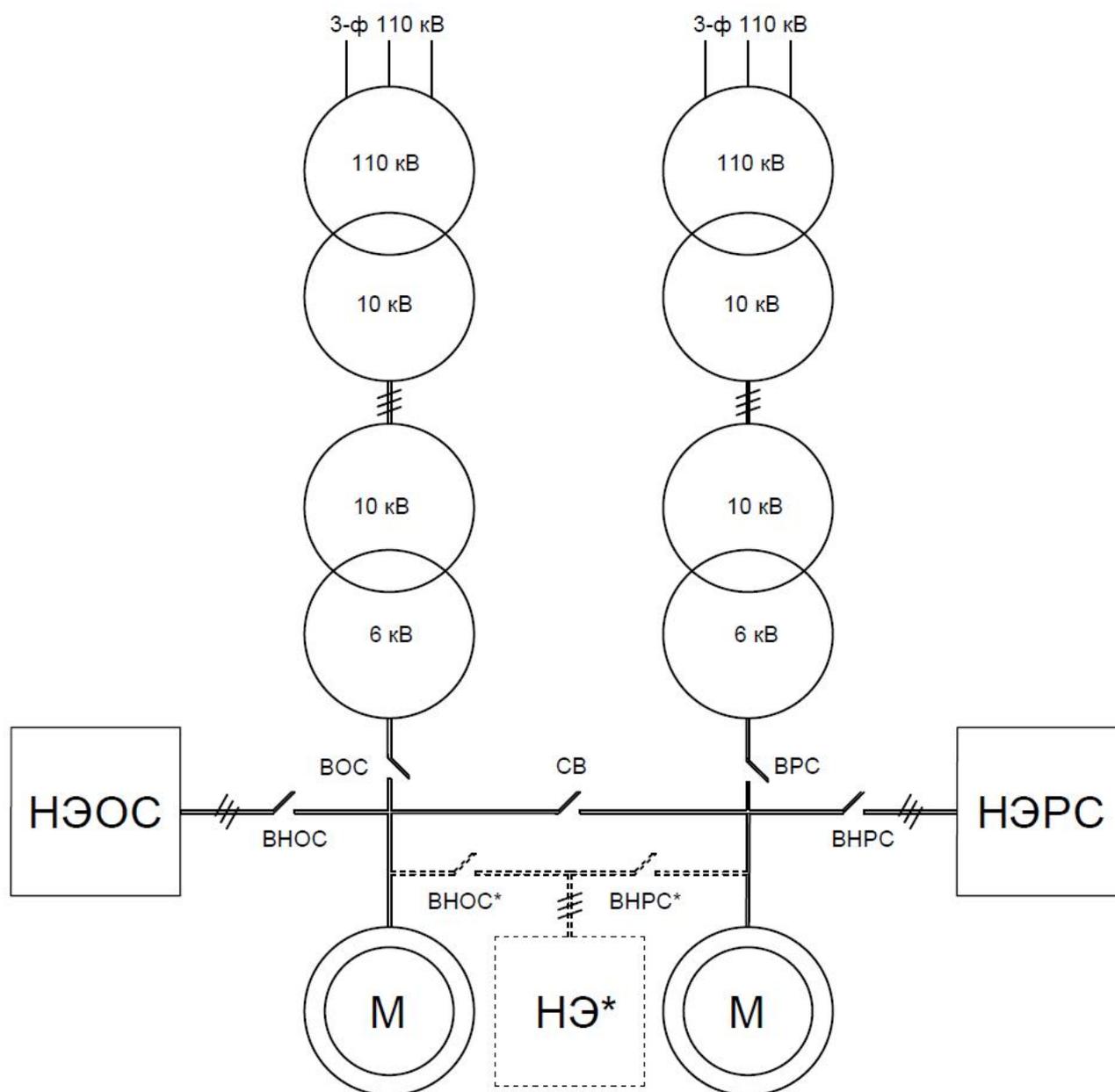


Рисунок 2.1 – Обобщённая электрическая схема объекта исследования

Рассматриваемая электромеханическая система состоит из двух электрических приводов, каждый из которых имеет свой источник питания и свою нагрузку. В одной из сетей присутствует блок, который намеренно формирует аварийную ситуацию. Для удобства характеристики процессов, протекающих в данных сетях, назовем сеть в которой будет имитироваться авария основной, тогда

вторую сеть резервной.

На схеме использованы следующие обозначения: НЭОС – накопитель энергии основной сети, НЭРС – накопитель энергии резервной сети, ВНОС – выключатель накопителя основной сети, ВНРС – выключатель накопителя резервной сети, ВОС – выключатель основной сети, ВРС – выключатель резервной сети. В приведенном варианте обобщенной схемы рассматриваются два варианта резервирования накопителем – индивидуально для каждой из сетей, совместно для обеих сетей.

Также следует отметить, что в систему заложены параметры кабельной линии (учитываются *RLC*-параметры схемы замещения ЛЭП) от 3-ф источника напряжения до трансформатора 110/10 кВ, как для одной, так и для другой сетей.

2.2 Формирование структурных звеньев имитационной модели для исследуемого объекта

2.2.1 Параметры источника энергии и трансформаторов

Источник напряжения, условно считается источником бесконечной мощности. Параметры блока, представляющего собой модель источника представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры источника напряжения

Параметр	Характеристика параметра
Номинальное действующее линейное напряжение	110 кВ
Фазовый сдвиг	0 °
Частота	50 Гц
Внутреннее сопротивление источника	Нет

В исследуемой модели рассматриваются трансформаторы верхнего и нижнего уровней. Параметры трансформатора верхнего уровня определяются

значениями напряжения 110/10 кВ, в то время как напряжение 10/6 кВ относится к трансформатору нижнего уровня. Параметры трансформаторов приведены в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Параметры трансформатора верхнего уровня

Параметр	Характеристика параметра
Номинальная полная мощность	63 МВА
Номинальная частота	50 Гц
Тип первичной обмотки	Звезда с нулевой точкой
Номинальное напряжение первичной обмотки	110 кВ
Тип вторичной обмотки	Звезда с нулевой точкой
Номинальное напряжение вторичной обмотки	10 кВ
Тип магнитопровода	Трехфазный трехсекционный

Таблица 2.3 – Параметры трансформатора нижнего уровня

Параметр	Характеристика параметра
Номинальная полная мощность	2 МВА
Номинальная частота	50 Гц
Тип первичной обмотки	Звезда с нулевой точкой
Номинальное напряжение первичной обмотки	10 кВ
Тип вторичной обмотки	Звезда с нулевой точкой
Номинальное напряжение вторичной обмотки	6 кВ
Тип магнитопровода	Трехфазный трехсекционный

Динамические переходные процессы в обмотках трансформаторов

определяются только реактивным и активным сопротивлениями. Нелинейности магнитной цепи трансформатора в цифровой модели не учитываются. Основная и резервная сеть имеют идентичные трансформаторы.

2.2.2 Параметры нагрузки

Потребитель представлен моделью асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) мощностью 1000 кВт.

Расчет параметров электродвигателя осуществлялся в соответствии со справочником [40] на основе Г-образной схемы замещения. Данные электродвигателя представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры электродвигателя

Параметр	Характеристика параметра
Номинальная мощность	1 МВт
Номинальное напряжение	6 кВ
Номинальная частота	50 Гц
Число пар полюсов	2
Тип ротора	Короткозамкнутый
Активное сопротивление статора, R_s	0,182 Ом
Сопротивление рассеяния статора, X_{ls}	3,950 Ом
Приведенное к статору активное сопротивление ротора, R_r'	0,157 Ом
Приведенное к статору сопротивление рассеяния ротора, X_{lr}'	3,930 Ом
Главное сопротивление магнитной цепи, X_m	151,470 Ом

Для имитационного моделирования технологического процесса и технологического оборудования в диссертационном исследовании используются

данные сетевого насоса СЭ 1250-140-11.

СЭ 1250-140-11 – это центробежный, горизонтальный, спиральный, с двойным входом, одноступенчатый насос. Они предназначены для подачи воды в системы отопления с температурой до 180 °С, содержащей твердые частицы размером до 0,2 мм и концентрацией до 5 мг/л [41]. В таблице 2.5 приведены технические характеристики насоса.

Таблица 2.5 – Технические характеристики насоса СЭ-1250-140-11

Параметр	Характеристика параметра
Область применения	Перекачивание воды в тепловых сетях, тепловая энергетика
Перекачиваемая среда	Вода чистая, вода горячая, сетевая вода
Подача, м ³ /ч	1250
Напор, м	140
Мощность, кВт	630
Масса, кг	6765
Частота вращения, об/мин	1500
Допустимый кавитационный запас, м	7,5
Габаритные размеры, мм	4375x1530x2220
Температура жидкости, °С	180
Внутренний диаметр напорного патрубка, мм	300
Внутренний диаметр всасывающего патрубка, мм	400
Давление на входе в насос, кгс/см ²	11

Система формирования нагрузки на валу двигателя представлена на рисунке 2.2. Представленная система имитирует нагрузку вентиляторного типа, при этом момент нагрузки пропорционален квадрату частоты вращения ротора двигателя

[42]. Все коэффициенты в блоке «Подсистема формирования нагрузки» вычислены таким образом, чтобы при номинальной частоте вращения двигатель получил номинальный момент нагрузки на валу, что соответствует номинальной рабочей точке электропривода реального оборудования (насосной станции).

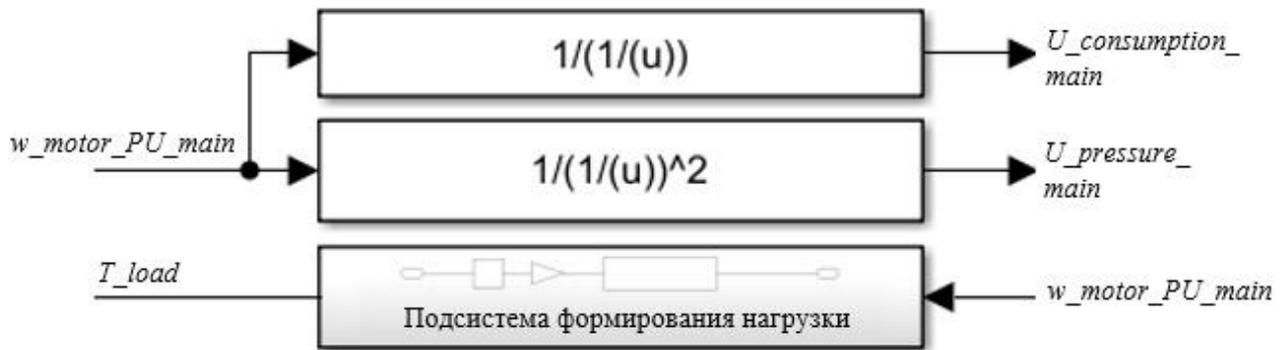


Рисунок 2.2 – Структурная схема формирования нагрузки на валу двигателя

Также следует отметить, что во избежание безынерционного алгебраического кольца в системе «Частота вращения – момент нагрузки» внесена дополнительная фазовая задержка 10 мс на реакцию смены направления вращения. Эта задержка не влияет на основные исследуемые процессы.

Ниже приведены графики переходных процессов по угловой частоте вращения и моменту на валу электродвигателя, а также напряжение и ток обмотки статора (рисунок 2.3) и графики переходных процессов по току и напряжению в первичной обмотке трансформатора 10/6 кВ (рисунок 2.4). Электропривод работает в следующих режимах: прямой пуск двигателя, отключение его от питающей сети и включение его в ту же сеть (2 – 2,5 с.).

Для наглядности представления результатов моделирования на рисунках 2.3 – 2.4 и последующих графиках переходных процессов, временной интервал прямого пуска двигателя был намеренно сокращен. Начальный этап моделирования производился из установившихся значений механических координат асинхронного двигателя.

Номинальные параметры асинхронного двигателя и центробежного насоса,

используемых для имитационного моделирования в диссертационной работе, приведены в таблицах 2.4 – 2.5 соответственно.

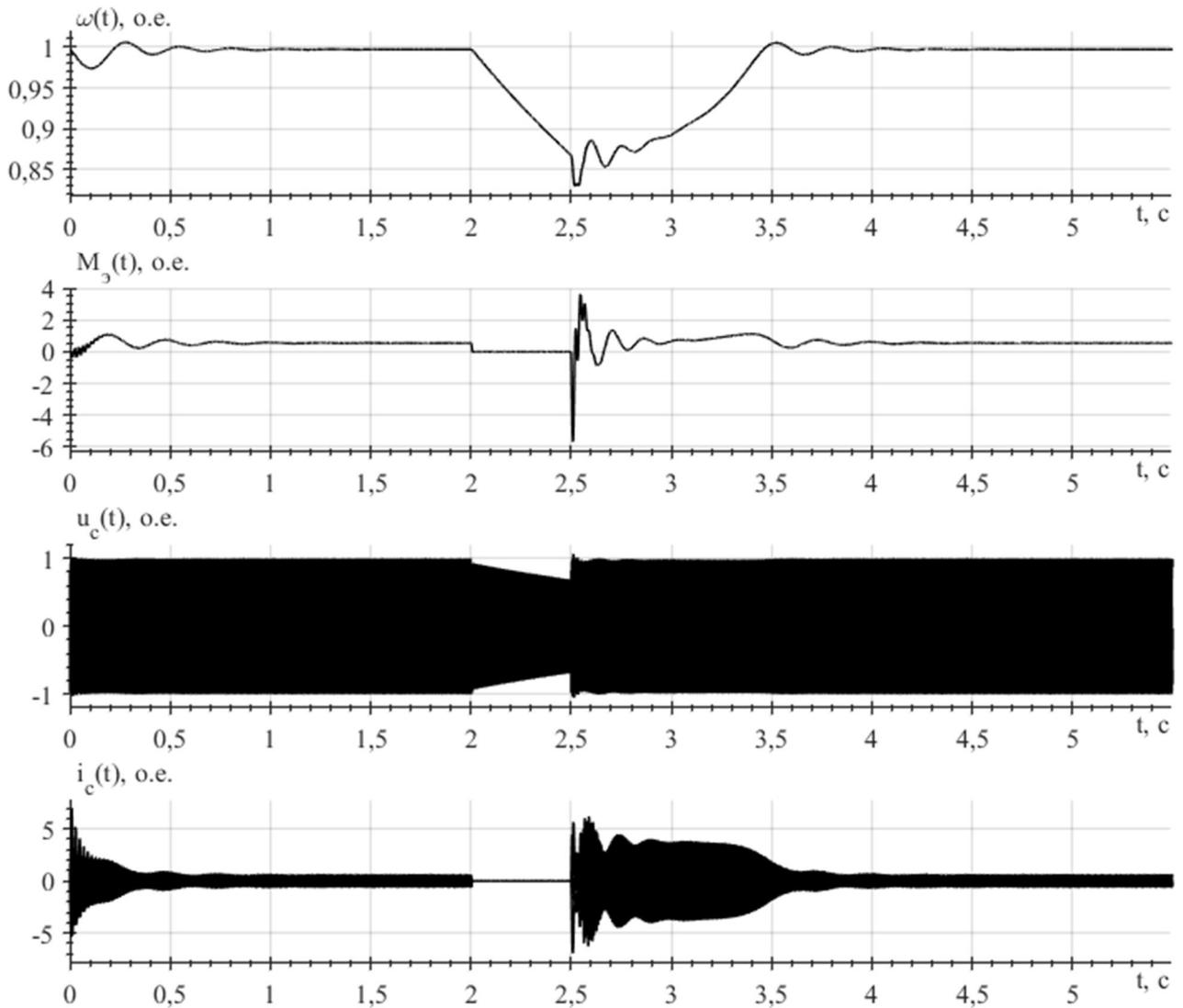


Рисунок 2.3 – Частота вращения, момент, напряжение и ток двигателя в режиме прямого пуска

Получение данных графиков обусловлено необходимостью понимания принципиальной работоспособности создаваемой имитационной модели системы электропривода в целом.

На рисунке 2.4 приведены графики переходных процессов для тока и напряжения первичной обмотки трансформатора в режиме прямого пуска. По данному рисунку можно констатировать электромеханический удар в результате

повторного включения в сеть, что наглядно отражает график переходного процесса по моменту двигателя (рисунок 2.3).

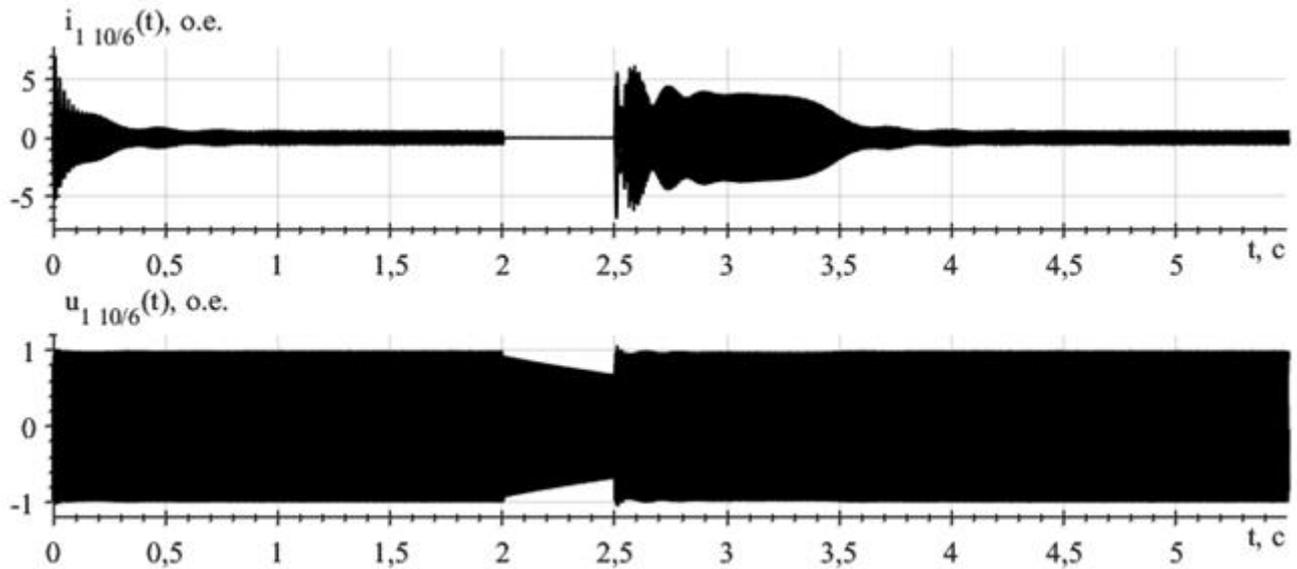


Рисунок 2.4 – Ток и напряжение первичной обмотки трансформатора в режиме прямого пуска

Отсюда следует, что для устранения негативного влияния перебоев в электропитании необходима разработка и внедрение в энергосистему устройств, организующих бесперебойное электроснабжение электропривода, которыми в свою очередь могут выступать автоматический ввод резерва и быстродействующий автоматический ввод резерва.

2.2.3 Параметры выключателей автоматического ввода резерва и быстродействующего автоматического ввода резерва

Большое значение на показатели качества переходных процессов при переключении нагрузки с основной сети на резервную оказывают временные уставки срабатывания высоковольтных выключателей. В данном разделе приведены основные характеристики выключателей, используемых при цифровом моделировании систем АВР и БАВР.

Если говорить о выключателях, которые применяются в устройствах АВР, то

большое применение находят маломасляные выключатели. Масло используется в основном как дугогасительная среда, а изоляция токоведущих частей обеспечивается с помощью изоляторов и воздуха. Благодаря незначительному объему масла (в десятки и даже сотни раз меньше, чем в многообъемных баковых с такими же характеристиками), а также высокой прочности баков, их считают более взрыво- и пожаробезопасными.

Каждый разрыв цепи в малообъемном выключателе происходит в отдельном баке, в который встроена специальная дугогасительная камера обычно с поперечным дутьем.

В таблице 2.6 приведены временные характеристики выключателя ВМГ-133.

Таблица 2.6 – Технические (временные) характеристики выключателя ВМГ-133

Параметр / ед. измерения	Значение
Время отключения до погасания дуги с приводом ПЭ-111ПП-67, с, не более	0,121
Собственное время включения выключателя с приводом, с, не более	0,300

В качестве параметров, необходимых для исследования системы БАВР, будут использованы временные уставки быстродействующих выключателей *ВВ/TEL*, значения которых приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Основные технические параметры быстродействующих выключателей *ВВ/TEL*

Параметр / ед. измерения	Значение
Собственное время включения выключателя при использовании устройства управления <i>TER_CM_16_FT(220_3)</i> , мс, не более	22
Собственное время отключения выключателя при использовании устройства управления <i>TER_CM_16_FT(220_3)</i> , мс, не более	10

Следующий раздел посвящен руководству к пользованию имитационной моделью.

2.3 Руководство к пользованию имитационной моделью

Полновесная структурная схема всего электротехнического комплекса приведена в Приложении В (рисунок В.1). Представленная структура универсальна, у исследователя имеется возможность выбора опыта внутри одной модели.

Общая структура модели энергосистемы представлена в модульном виде, что позволяет реализовать подход взаимозаменяемости и исключения сгруппированных подструктур без ущерба для целостности всего алгоритма вычисления. Такой алгоритм можно сравнить с системой «*plug & play*», при котором исключение или замена любой из подструктур не влияет на работоспособность всей динамической модели в целом.

Дополнительно в имитационную модель встроена возможность выбора опыта, проводимого для электротехнического комплекса. К исследованию доступно 4 опыта, среди них: моделирование системы АВР; модели опыта выбега асинхронного двигателя; модели БАВР, система управления которым построена на основе опыта выбега двигателя; модели БАВР в совокупности с накопителем энергии. Подсистемы выбора опыта для исследования представлены в Приложении В (рисунок В.2). Блок «БАВР и накопитель» имеет отчетливое выделение цветом по причине того, что в момент выполнения снимка экрана он являлся активным и рассматривался данный конкретный опыт.

При выборе любого из вышеперечисленных опытов, имитационная модель динамически реконфигурирует не только структуру управления, но и модель топологии электросети. Во избежание нагромождения структур, а также с целью оптимизации скорости вычисления высокоточной имитационной модели и эргономичного и понятного управления ею, был реализован аналог графического интерфейса пользователя, который представлен в Приложении В (рисунок В.3).

Использование графического интерфейса автоматически меняет основные рутинные параметры модели для каждого опыта. Код, заложенный в кнопку «Применить», этих изменений представлен в Приложении В (рисунок В.4).

Флаг *flag_invertor* отвечает за включение в структуру имитационной модели моделей инвертора и накопителя энергии. Параметр *t_sim* устанавливает конечное время моделирования для каждого из опытов. Параметр T_s представляет собой оптимальную дискретизацию имитационной модели во времени. Этот параметр должен быть кратным и в 5 – 10 раз меньше T_{pwm} .

Переменные среды моделирования являются результатом прямого конструкторского расчета, производимого в отдельном файле, который обладает проверками исполнимости. Во взаимодействии с графическим интерфейсом осуществляется двустороннее взаимодействие между файлом конструкторского расчета и непосредственно имитационной моделью.

Результаты вычислений сгруппированы и им присвоено имя для использования в единой среде графического анализа *data inspector*.

Реализация алгоритма управления энергосистемой для каждого из опытов основана на методе конечных автоматов. При таком подходе сама структура легко читаема, а в алгоритме управления не остаётся неучтенных состояний системы. При отсчете времени моделирования отображается таблица логических состояний внутренних переменных алгоритмов управления, а также динамическая анимация переходов между конечными автоматами.

Представленная модель может быть реструктурирована подготовленным пользователем без риска рекурсивного исправления ошибок, а также в достаточной степени понятна для пользователей, использующих эту имитационную модель в качестве инструмента анализа, лишь с помощью изменения входных данных.

Последовательность действий при запуске имеет следующую иерархию:

1. Запустить файл конструкторского расчёта
2. Осуществить выбор опыта в графическом интерфейсе
3. Запустить имитационное моделирование
4. Осуществить анализ переходных процессов во встроенном

приложении *data inspector*.

2.4 Имитационное моделирование системы управления устройством автоматического ввода резерва

Нужно отметить, что асинхронный двигатель работает без управляемого полупроводникового преобразователя и включается прямой подачей напряжения на обмотку статора. В реальных производственных условиях такой режим для двигателей данной мощности реализуется редко. В представленной цифровой модели данный режим используется лишь для предельной качественной оценки переходных процессов при импульсных воздействиях [43]. То есть рассматривается самый тяжёлый режим работы электропривода при отключении его от питающей сети переменного напряжения и при повторном его включении в ту же самую питающую сеть.

Алгоритм работы управляющей части структуры состоит в следующем:

1. Осуществляется отключение первичной обмотки трансформатора от идеального источника ЭДС. При этом наблюдаются электромеханические переходные процессы на выбеге асинхронного двигателя. Система управления осуществляет отслеживание действующего значения напряжения на обмотке статора асинхронного двигателя.

2. По достижению напряжения $U_1 < 0,9 \cdot U_{Iном}$ осуществляется включение секционного выключателя к резервному источнику питания. Следует отметить, что вычисление среднедействующего значения напряжения на статоре АД может осуществляться, например, путем вычисления амплитуды синусоиды приложенного напряжения и ее фильтрации через апериодическое звено 1 порядка.

Применяются разные способы составления систем управления при имитационном моделировании. Одним из них является использование ключей, различных релейных элементов (имеем в конечном счете аналог релейно-контактной схемы) [44]. Пример такой системы управления АВР представлен в Приложении В (рисунок В.5). Цифровая модель представлена идеальным

переключающим устройством с сопротивлением в нормально замкнутом состоянии 10^{-6} Ом и сопротивлением в разомкнутом состоянии 10^6 Ом.

Этот способ примечателен своей интуитивной понятностью и прямой логикой. Но у него есть и существенный недостаток, связанный с тем, что при повышении сложности исследуемой системы, результатом становится неизбежное разрастание имитационной модели и невозможность ее реализации в конечном счете. С помощью подобного рода блоков, ключей, релейных элементов очень сложно разработать практически реализуемую логику системы управления.

В виду сложности составления алгоритма работы АВР с помощью ключей, релейных элементов с одной стороны, и для того, чтобы приблизить создаваемую систему к возможности реального исполнения и обеспечения более удобной отладки системы при изменении условий ее работы с другой стороны, предлагается использовать функционал раздела *matlab* «*stateflow*» [45].

Система управления АВР представлена в Приложении В (рисунок В.6).

Переходные процессы логических состояний системы управления (укрупненно моменты переключения) приведены на Рисунке 2.5.

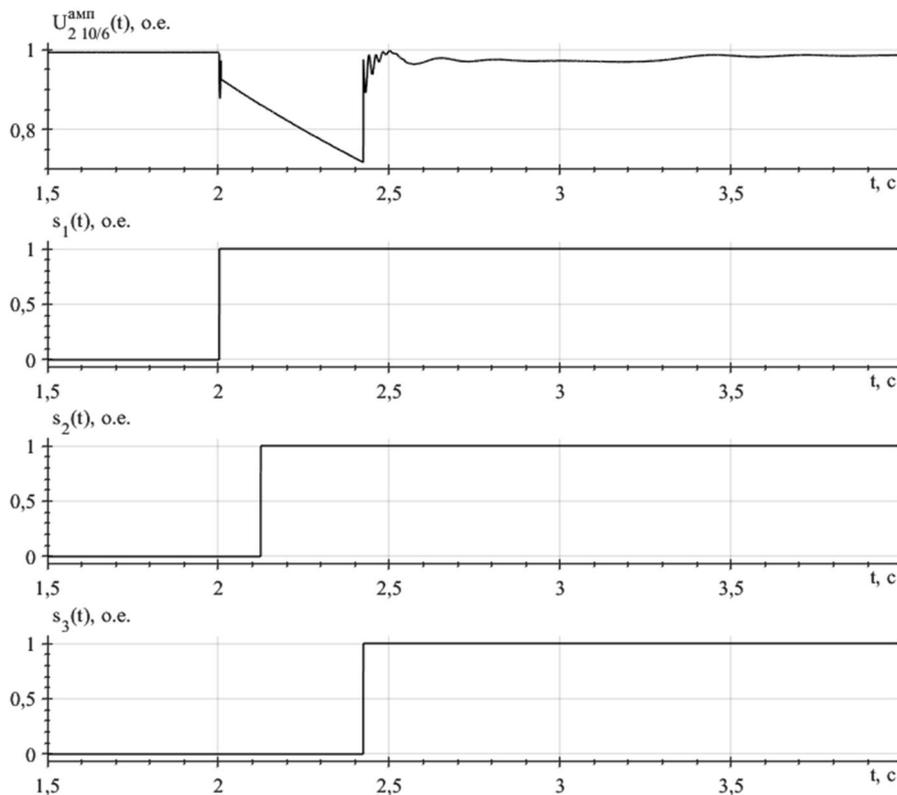


Рисунок 2.5 – Переходные процессы логических состояний системы управления

Сверху вниз располагаются следующие графики переходных процессов: $U_{2\ 10/6}^{\text{амп}}$ – сигнал напряжения, прошедший предварительную фильтрацию, S_1 – логическое состояние выхода СУ, S_2 – срабатывание выключателя основной сети, S_3 – срабатывание секционного выключателя.

Графики переходных процессов, представленные выше, описывают логику работы системы управления АВР. При снижении напряжения ниже заранее определенного уровня (данная уставка регулируется в зависимости от типа объекта и в текущих исследованиях принята в значении 10 % от номинального напряжения) система управления определяет аварийную ситуацию и отправляет сигнал переключения на резервную сеть. Данный процесс происходит не сразу, так как алгоритм учитывает временные задержки коммутационного оборудования (на отключение выключателя основной сети и на включение секционного выключателя).

Переходные процессы, демонстрирующие результаты работы алгоритма управления АВР для основной сети представлены на рисунках 2.6 – 2.7.

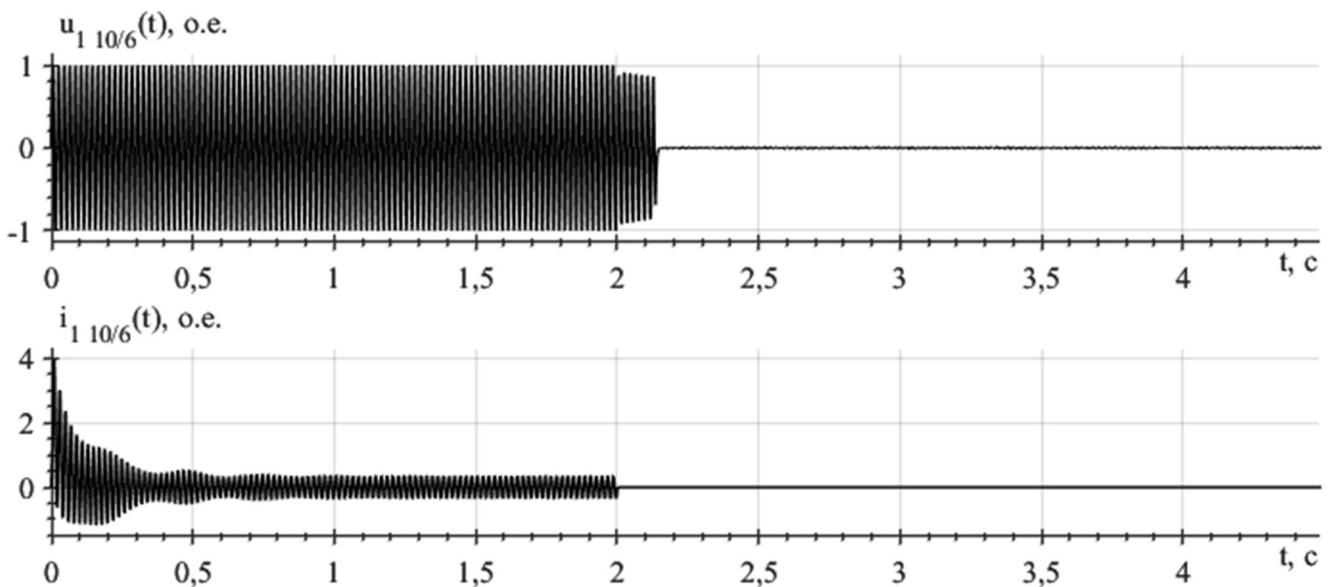


Рисунок 2.6 – Напряжение и ток в первичной обмотке основной сети

На рисунке 2.6 представлены переходные процессы по напряжению и току в первичной обмотке основной сети.

Если описывать работу логики системы управления АВР, то иерархия будет следующей: «Авария» – «Фиксация снижения значения напряжения» – «Формирование сигнала на отключение выключателя основной сети» – «Отключение основной сети» – «Формирование сигнала на включение секционного выключателя» – «Включение секционного выключателя» – «Восстановление работы электротехнического комплекса».

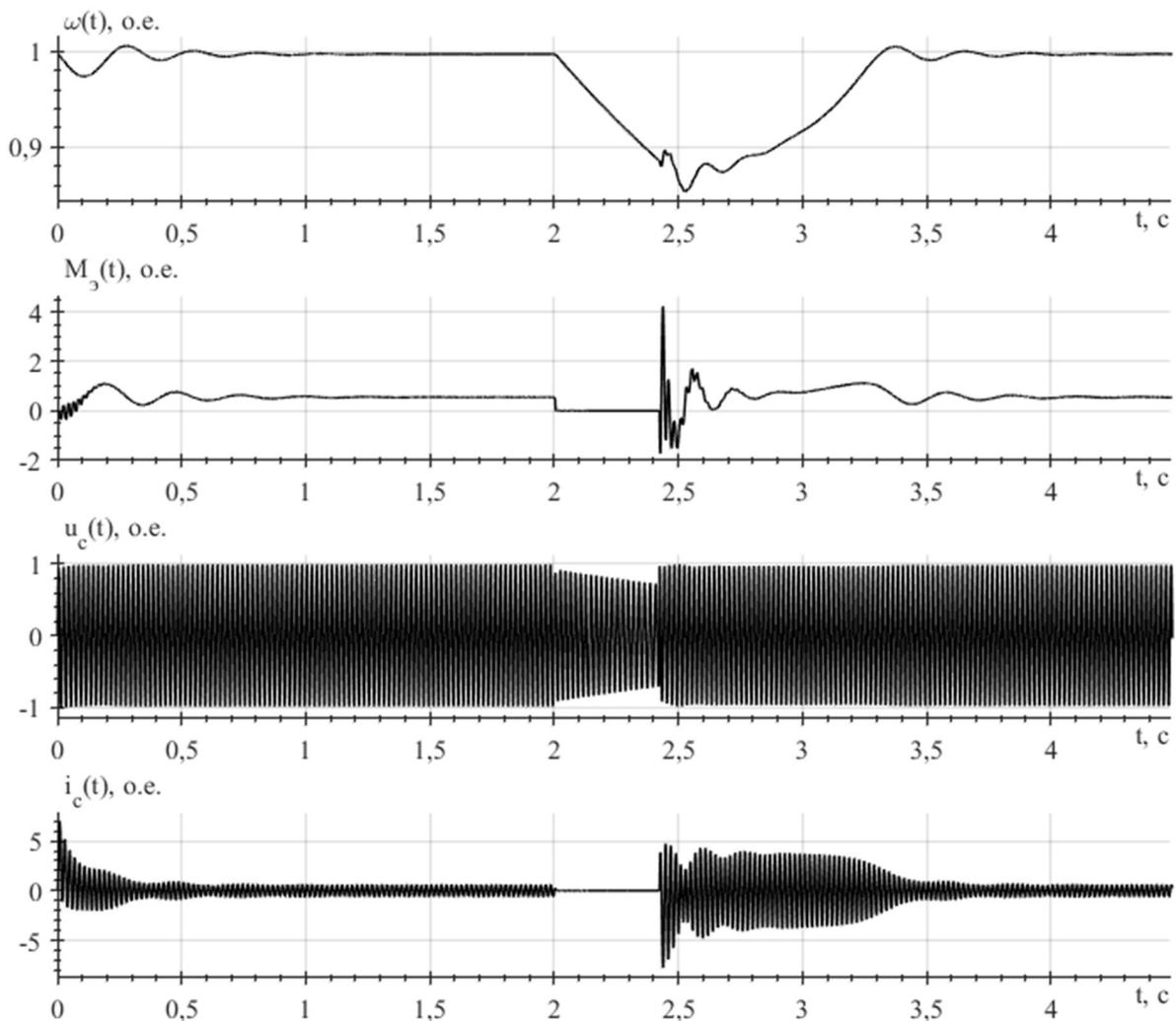


Рисунок 2.7 – Электромеханические и электрические переходные процессы в двигателе основной сети

На рисунке 2.7 в момент времени приблизительно 2,4 секунды включается в работу секционный выключатель, о чем свидетельствует максимальное амплитудное значение тока вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ

(соответствующее аналогичному максимальному току в первичной обмотке). Данный бросок тока провоцирует превышение тока двигателя и электромагнитного момента в несколько раз в сравнении с номинальными значениями при имеющейся разнице фаз между напряжением питающей сети вторичной обмотки и ЭДС электродвигателя на выбеге.

Переходные процессы, сопровождающие работу нагрузки от резервной сети, не приводятся, так как их характер корректный, а временные интервалы, которые нуждались бы в комментариях не присутствуют. По графикам переходных процессов для напряжения и тока первичной и вторичной обмоток резервной сети можно сделать заключение о корректной работе электромеханической системы с имеющейся динамической просадкой, возникающей в момент подключения нагрузки от основной сети.

Если анализировать электромеханические переходные процессы в двигателе, изначально подключенном к резервной сети, то можно констатировать небольшое значение просадки частоты вращения и соответствующий бросок электромагнитного момента. В целом можно сделать вывод о безаварийной работе резервной сети.

Таким образом, в качестве промежуточного вывода можно утверждать, что был выполнен критический анализ классических АВР в структуре электроснабжения предприятий. Не учёт момента переключения нагрузки напрямую сказывается на показателях качества ее подключения к резервной сети и является критическим для электрооборудования [46]. Многими исследователями разработаны различные варианты решения данной проблемы. Отдельно хотелось бы отметить работу Носа О.В., который предлагает собственный оригинальный подход [47].

2.5 Синтез и имитационное моделирование системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва

Одной из основных функций при разработке системы управления БАВР

является контроль момента переключения нагрузки с основной сети на резервную сеть. Разрабатываемая система управления БАВР за счет целенаправленного выбора временного интервала на переключение, должна обеспечить минимальный бросок тока в нагрузке [48].

В систему БАВР должна быть заложена модель механики асинхронного двигателя, которая определяет поведение затухающей ЭДС, характеризующейся своим амплитудным значением и фазовым сдвигом [49]. При постоянно затухающей ЭДС необходимо выравнивать, как амплитуду, так и фазовое рассогласование с резервной сетью. Причем рассогласование фаз напрямую влияет на бросок тока электродвигателя при его переключении [50].

Главной задачей дальнейших исследований является выделение значения фазы резервной сети и фазы затухающей ЭДС двигателя.

2.5.1 Расчет фазового рассогласования сетей

На рисунке 2.8 представлена система расчета фазового рассогласования напряжения резервной сети и ЭДС двигателя.

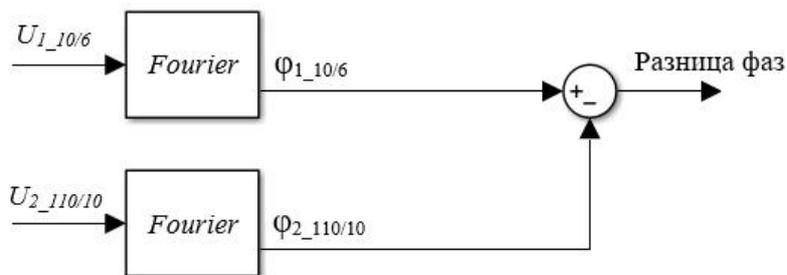


Рисунок 2.8 – Система расчета фазового рассогласования напряжения резервной сети и ЭДС двигателя

Процесс вычисления производится при использовании блока «*Fourier*». На вход данного блока поступают сигналы напряжений первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ основной сети и вторичной обмотки трансформатора 110/10 кВ резервной сети. В каждом блоке «*Fourier*» выделяются фазы напряжений, после чего осуществляется их сравнение с некоторой эталонной

синусоидой и вычисляется рассогласование между фазами соответствующих напряжений и эталонным сигналом. Далее производится второе сравнение, но уже разницы фаз соответствующих напряжений между собой. Результаты моделирования представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

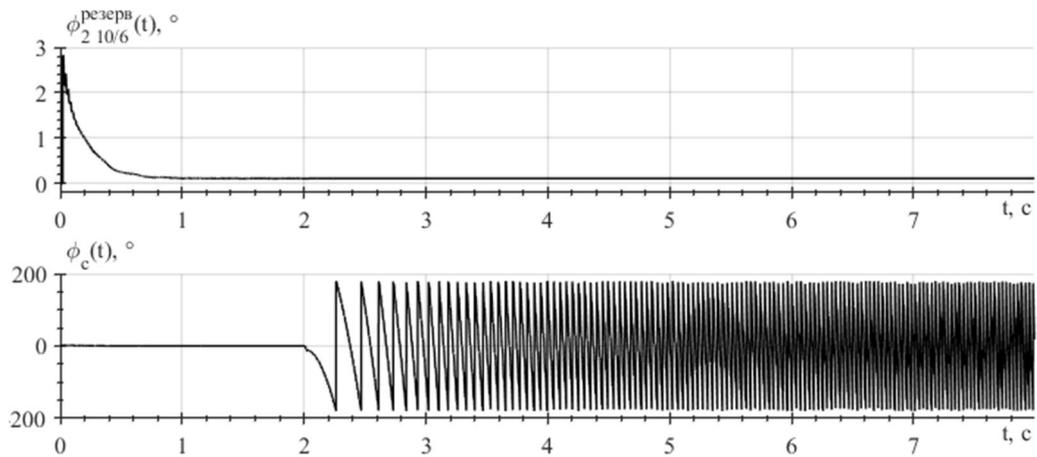


Рисунок 2.9 – Переходные процессы фазы резервной сети (сверху) и фазы затухающей ЭДС двигателя (снизу)

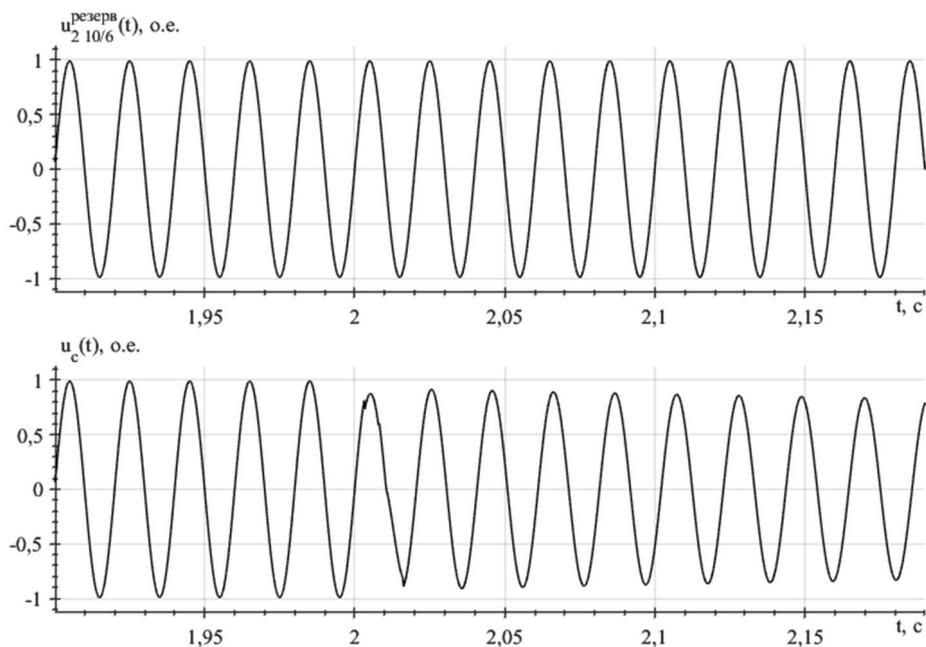


Рисунок 2.10 – Переходные процессы напряжений резервной сети и затухающей ЭДС двигателя

Следует отметить, что фаза резервной сети при моделировании имеет не

нулевое установившееся значение. Фаза равная 0 градусов соответствует идеальному источнику трехфазного напряжения сети 110 кВ. Описываемое фазовое рассогласование возникает в результате наличия в исследуемой системе линии электропередач и трансформаторов.

Из рисунка 2.10 можно сделать вывод о том, что в определенные моменты времени фазы напряжений согласуются. Таким образом можно выбрать определенный диапазон (или «коридор») переключения нагрузки, обеспечив тем самым допустимую кратность броска тока [51]. Причем сигнал на включение секционного выключателя должен учитывать временные задержки, связанные с уставками срабатывания коммутационной аппаратуры размыкателей.

2.5.2 Структура системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва

Известно, что время срабатывания отключающего контактора и секционного выключателя определяется время-токовой характеристикой аппарата [52]. В результате при идеализированных условиях определения аварийного режима работы сети, срабатывание секционного выключателя происходит с некоторой задержкой (от 2 до 4 периодов частоты питающего напряжения). В результате работа БАВР оказывается в недопустимом пределе рассогласования фаз между ЭДС, наведенной в первичную обмотку трансформатора 10/6 кВ за счет выбегающего ротора двигателя и фазой напряжения резервной питающей сети.

Такой алгоритм работы БАВР приводит к возникновению ударных токов в обмотках статора/ротора и бросков электромагнитного момента при повторном включении АД в резервную питающую сеть. Предлагается рассмотреть следующий алгоритм компенсации времени отключения и включения коммутирующих аппаратов:

1. Провести опыт выбега АД при отключении его от питающей сети на стороне вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ.
2. Осуществить запись зависимости текущей фазы ЭДС, наведенной в

обмотку статора в масштабе относительного времени.

3. Использовать записанную характеристику для предиктивного определения будущей разницы фаз ЭДС двигателя и питающего напряжения резервной сети и определения момента поддачи сигнала на замыкание секционного выключателя таким образом, чтобы полное включение коммутирующего аппарата было осуществлено в момент времени, соответствующему заданному диапазону рассогласования фаз, например ± 15 электрических градусов, от точки идеального момента включения.

Необходимо пояснить, что является точкой идеального включения секционного выключателя. Локально на промежутке времени, соответствующему 1 периоду питающего напряжения, такой точкой является фазовое рассогласование в 0 электрических градусов. В масштабе, времени, соответствующего более 1 периода питающего напряжения от момента отключения питающей сети, такой идеальной точкой будет являться ближайшее по времени фазовое рассогласование в 0 электрических градусов.

Таким образом, максимальный пусковой ток и бросок электромагнитного момента локально определяется разницей фаз между затухающей ЭДС и питающим напряжением резервной сети, но, если с момента отключения основной сети проходит более чем 1 период, амплитуда ЭДС двигателя уменьшается экспоненциально и необходимость согласования фаз нивелируется, так как, даже при идеальном согласовании в 0 градусов, разница мгновенных значений между текущей ЭДС и напряжением резервной питающей сети приведет к возникновению предельного ударного тока. Поэтому можно определить главный показатель качества разрабатываемой системы управления – быстродействие вычислений фазового рассогласования и определения ближайшего разрешенного момента переключения.

На рисунке 2.11 представлена структурная схема разработанной системы управления БАВР. Входным сигналом является мгновенное значение линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ основной питающей сети. Следует отметить, что указанное напряжение должно пройти через функцию

классического преобразования Фурье. Блок «Кривая выбега АД» представляет собой зависимость рассогласования фаз от времени, записанный в опыте выбега АД. Блок « t_{AVR_on} » содержит в себе задержку времени t_1 , имитирующую инерционность выключателя основной сети на стороне первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ и временную задержку t_2 , имитирующую инерционность секционного выключателя. Следовательно, сумма временных задержек (t_1+t_2) учитывает итоговую инерционность срабатывания выключателей. Учет описанных выше временных задержек в алгоритме управления БАВР необходим для того, чтобы сигнал на включение секционного выключателя был сформирован при требуемом (желаемом) рассогласовании фаз. Это один из элементов предиктивности предлагаемой системы управления БАВР.

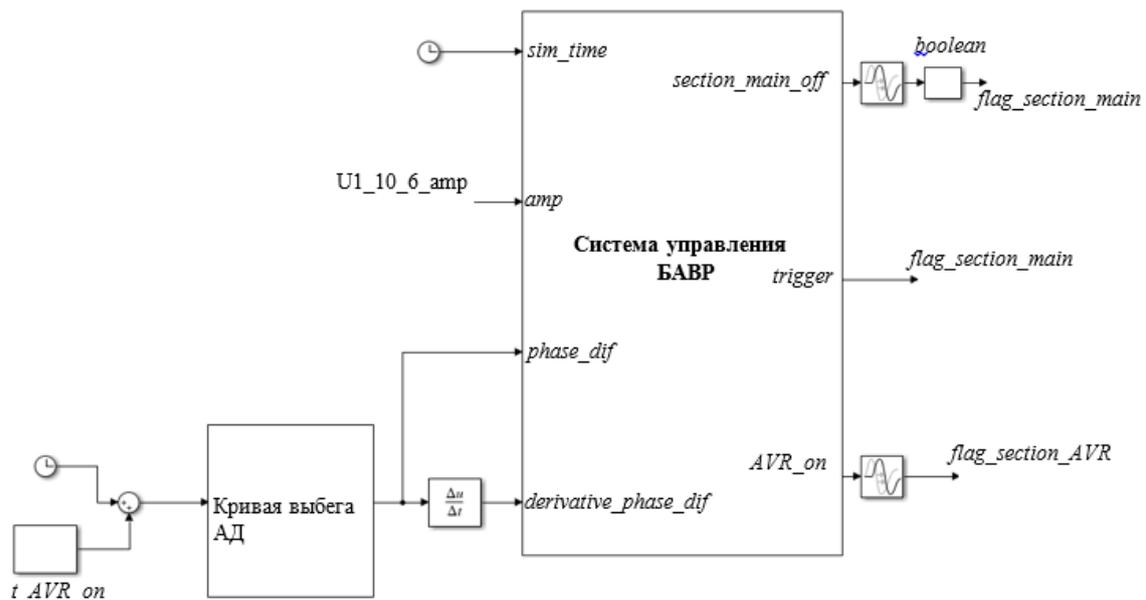


Рисунок 2.11 – Структурная схема разработанной системы управления БАВР

Блок «Система управления БАВР» представляет собой алгоритм выдачи логических состояний на управление включением секционного выключателя. Внутреннее устройство блока представлено в Приложении В (рисунок В.7). Основными задающими условиями данного блока являются следующие параметры: напряжение вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ основной питающей сети и допустимый «коридор» рассогласования фаз напряжения и ЭДС

двигателя.

Сигнал на включение секционного выключателя формируется строго после отключения вводного выключателя основной сети.

2.5.3 Опыт выбега двигателя асинхронного двигателя

Опыт выбега двигателя организован следующим образом. Сначала осуществляется пуск АД прямым включением в сеть, а затем его отключение. Опыт выбега двигателя, осуществляется путем отключения вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ от питающей сети, что имитирует аварийную ситуацию. Переходные процессы по координатам состояния двигателя представлены на рисунке 2.12.

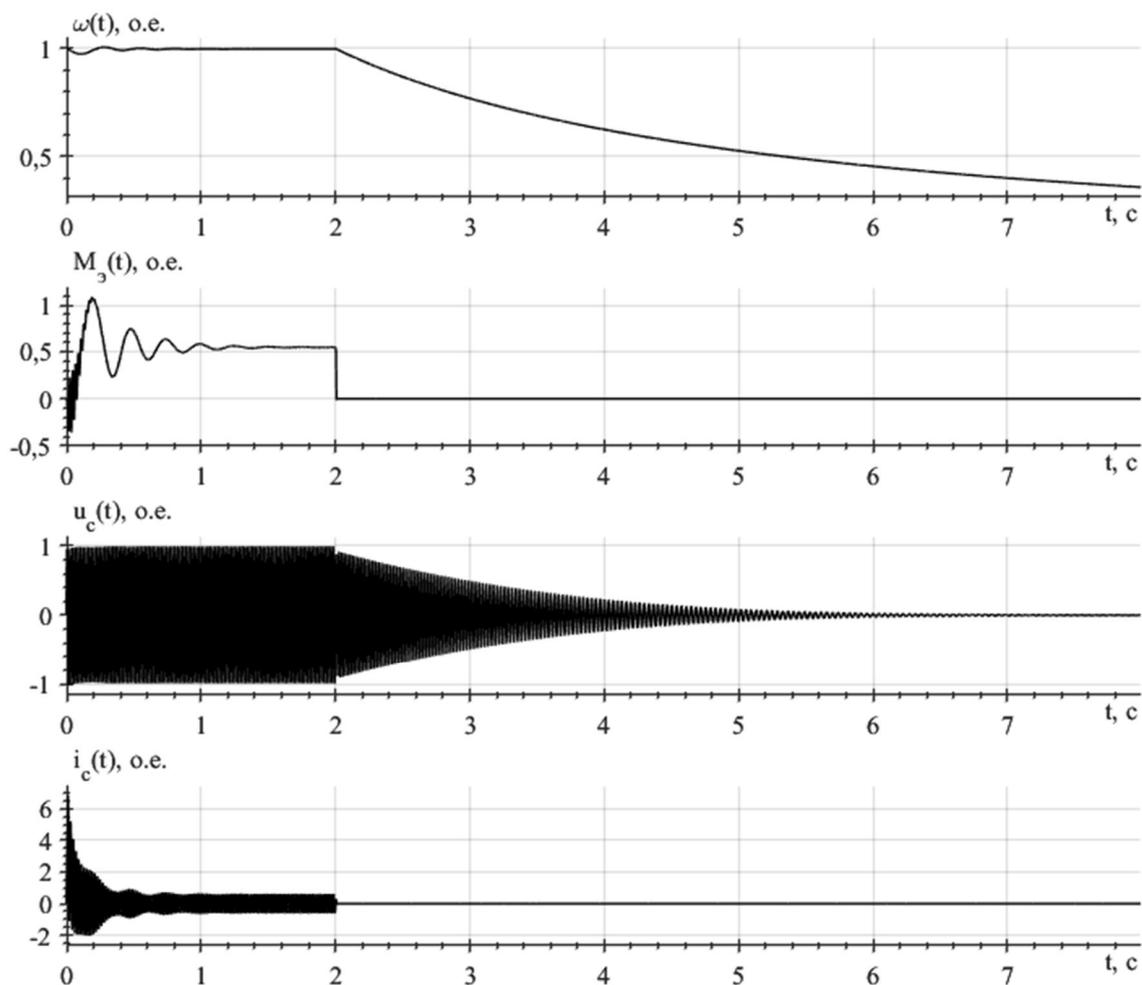


Рисунок 2.12 – Координаты состояния двигателя при его отключении от питающей сети

Переходные процессы по напряжению и току первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ представлены на рисунке 2.13.

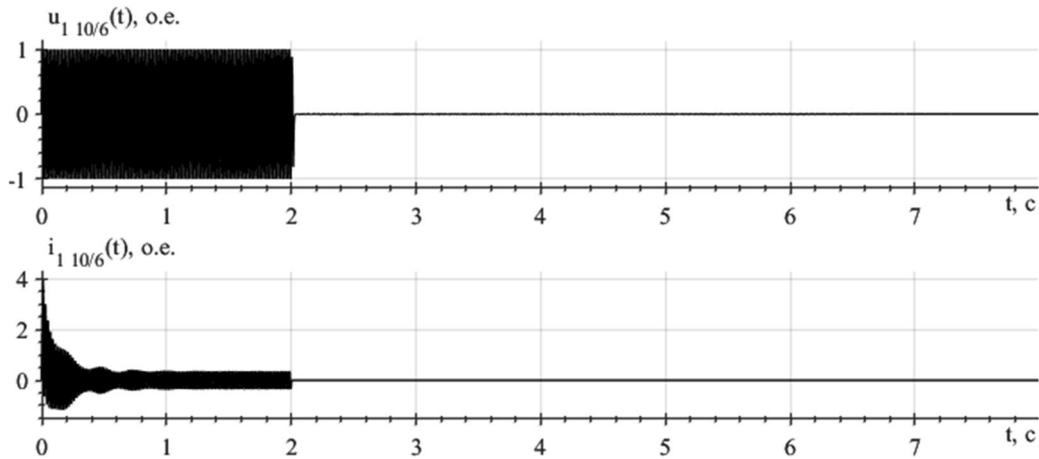


Рисунок 2.13 – Переходные процессы по напряжению и току первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ

На рисунке 2.14 представлен участок переходного процесса по рассогласованию фаз, соответствующий началу выбега двигателя.

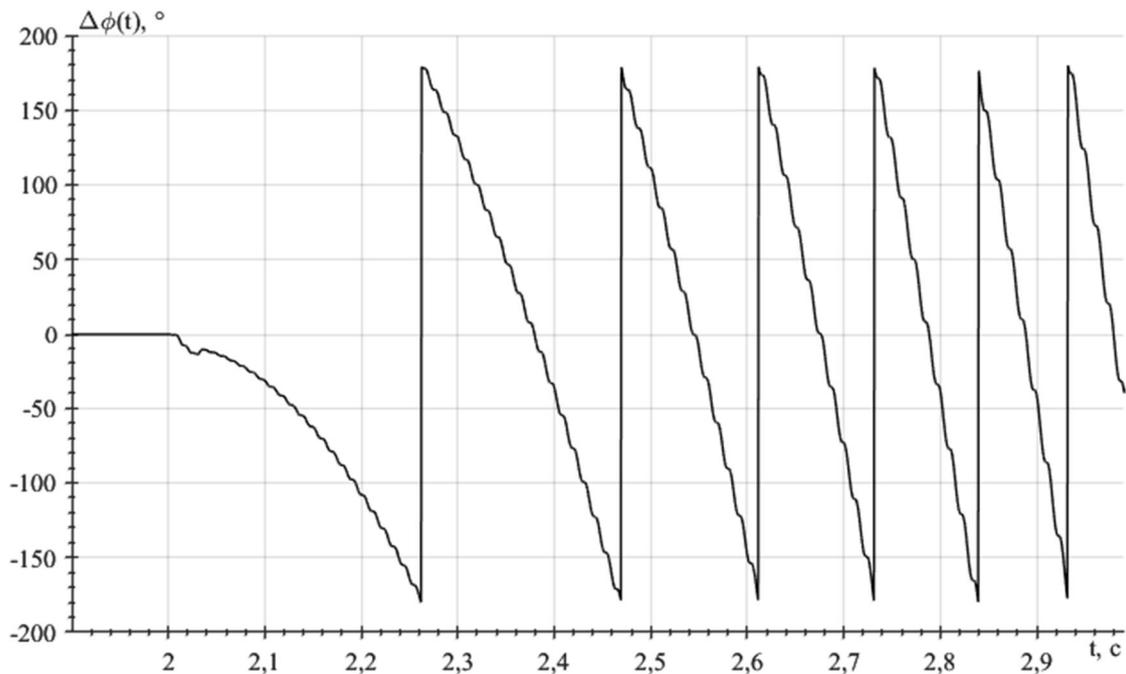


Рисунок 2.14 – Участок переходного процесса по рассогласованию фаз, соответствующий началу выбега двигателя

По результату опыта осуществляется запись переходного процесса рассогласования фаз между ЭДС двигателя и напряжением резервной питающей сети в переменную «*timeseries*», а также выделяется участок, соответствующий данным выбега, и формируются массивы значений рассогласования и текущего времени отдельно для составления таблицы состояний.

График переходного процесса по рассогласованию фаз, соответствующий началу выбега двигателя, имеет пилообразную форму изменения значения от -180 до +180 электрических градусов, что соответствует полному периоду ЭДС двигателя. Нужно отметить, что при моделировании возникает необходимость протоколирования данных о выбеге двигателя в табличном виде, которые в дальнейшем используются для предиктивного определения будущего рассогласования фаз с учетом инерционности коммутирующих аппаратов. В работе для этого был использован скрипт преобразования записанных данных. Скрипт и структуры представлены в Приложении В (рисунок В.8).

2.5.4 Исследование работы системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва

Имитация аварийной ситуации связана с возможностью выбора двух возможных вариантов:

1. Разрыв сети общего назначения (любое отключение, связанное с отключением аварийной автоматики верхних уровней сети);
2. Короткое замыкание (межфазное, глухое трехфазное короткое замыкание и замыкание одной из трех фаз на заземление-нейтраль). При этом нужно отметить, что максимальная ЭДС двигателя окажется меньше ожидаемой, так как короткое замыкание вызывает потерю энергии роторной цепи через сопротивление короткого замыкания. Другими словами, имеет место электрическое торможение в течении задержек срабатывания коммутационной аппаратуры [53].

В рассматриваемых опытах будет использован разрыв сети общего назначения.

Опыт 1.

Исходные данные:

1. Система управления определяет аварийную ситуацию, если напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается более, чем на 30 %;
2. Время возникновения аварии – на 2-ой секунде;
3. Диапазон допустимого рассогласования фаз ± 15 градусов от нулевого значения.

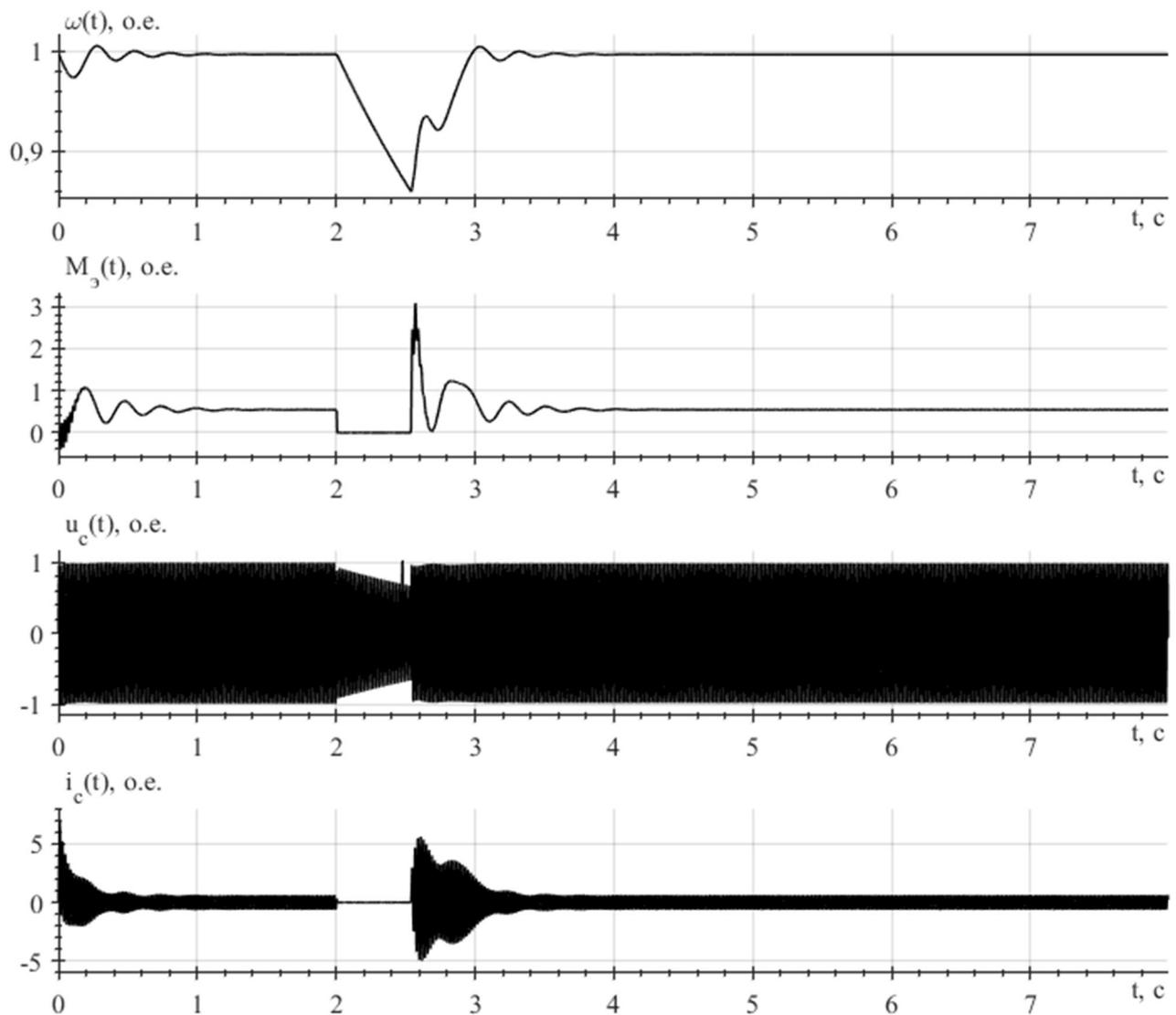


Рисунок 2.15 – Электромеханические и электрические переходные процессы двигателя, Опыт 1

Графики переходных процессов, представленные на рисунке 2.15

демонстрируют наличие бросков по моменту и току двигателя, превышающие предельно допустимые значения.

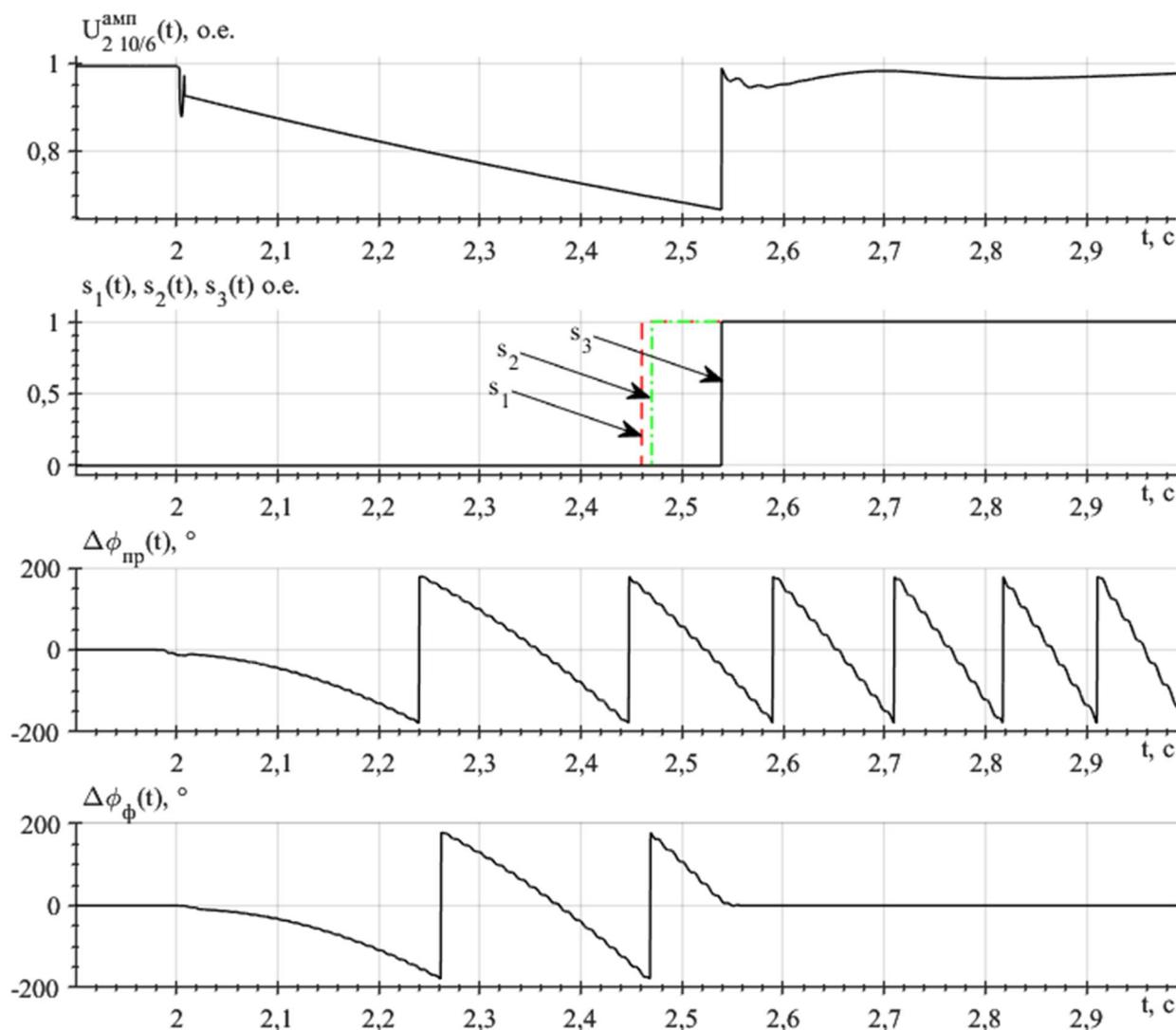


Рисунок 2.16 – Переходные процессы переменных системы управления (укрупненно момент включения), Опыт 1

Поясним изображенное на рисунке 2.16. Сверху вниз располагаются следующие графики переходных процессов: $U_{2 10/6}^{амп}$ – сигнал напряжения, прошедший предварительную фильтрацию, S_1 – логическое состояние выхода СУ, S_2 – срабатывание выключателя основной сети, S_3 – срабатывание секционного выключателя, $\Delta\phi_{пр}$ – предсказанное рассогласование фаз с учетом задержек, $\Delta\phi_{ф}$ – фактическое рассогласование фаз. Аналогичная иерархия применяется и для

следующих рисунков с логическими состояниями СУ.

Опыт 2.

Исходные данные:

1. Система управления определяет аварийную ситуацию, если напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается более, чем на 10 %;
2. Время возникновения аварии – на 2-ой секунде;
3. Диапазон допустимого рассогласования фаз ± 15 градусов от нулевого значения.

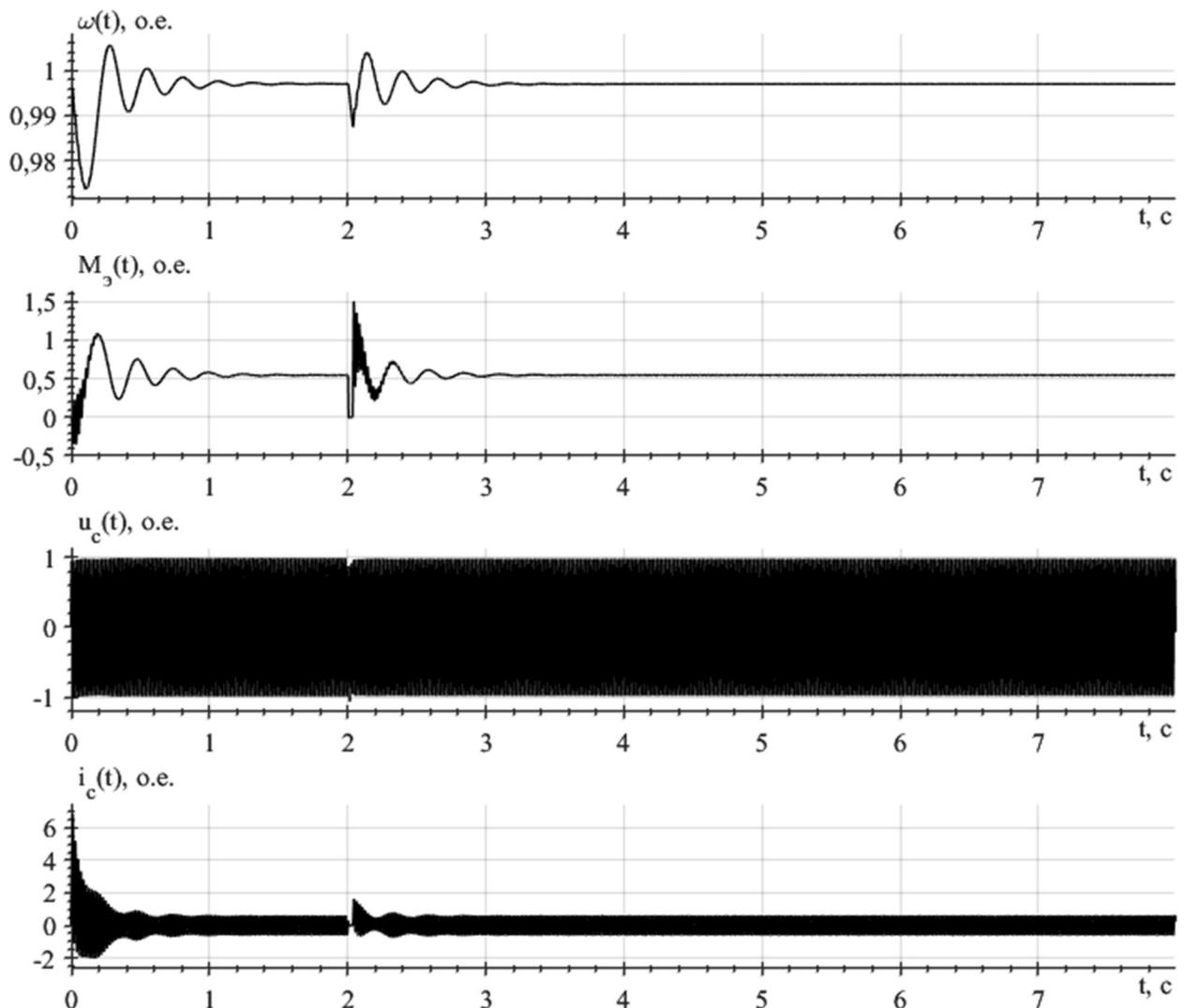


Рисунок 2.17 – Электромеханические и электрические переходные процессы двигателя, Опыт 2

Графики переходных процессов, представленные на рисунке 2.17

демонстрируют наличие бросков по моменту и току двигателя (не более, чем 1,5 от M_n и не более, чем 1,8 от I_n соответственно), не превышающие предельно допустимые значения.

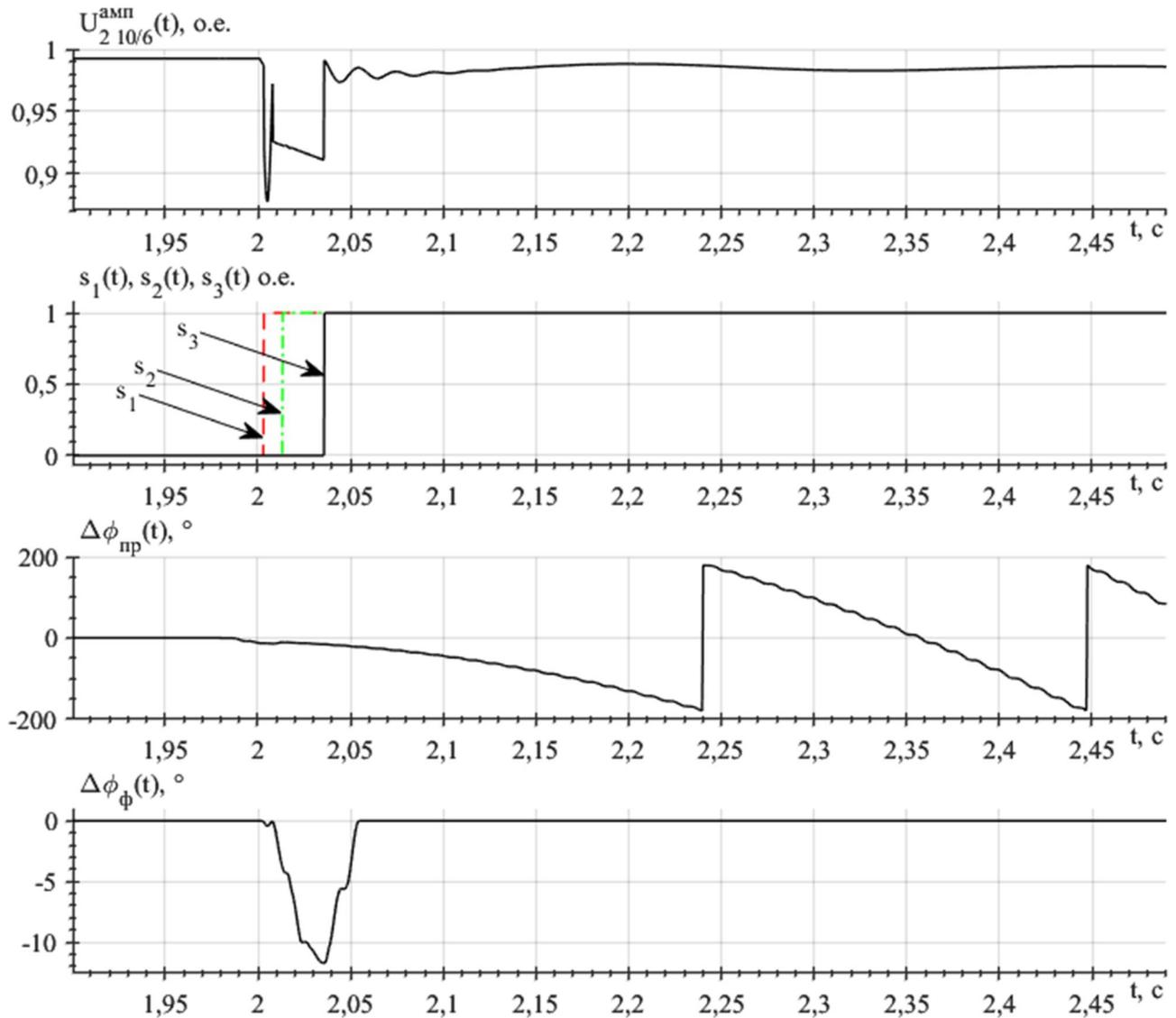


Рисунок 2.18 – Переходные процессы переменных системы управления (укрупненно момент включения), Опыт 2

Результаты первых двух опытов наглядно демонстрируют преимущества формирования уставки в алгоритме управления по снижению напряжения на 10%. В дальнейших опытах для исследования влияния «коридора» рассогласования фаз будет использовано 10% значение уставки.

Опыт 3.

Исходные данные:

1. Система управления определяет аварийную ситуацию, если напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается более, чем на 10 %;
2. Время возникновения аварии – на 2-ой секунде;
3. Диапазон допустимого рассогласования фаз ± 10 градусов от нулевого значения.

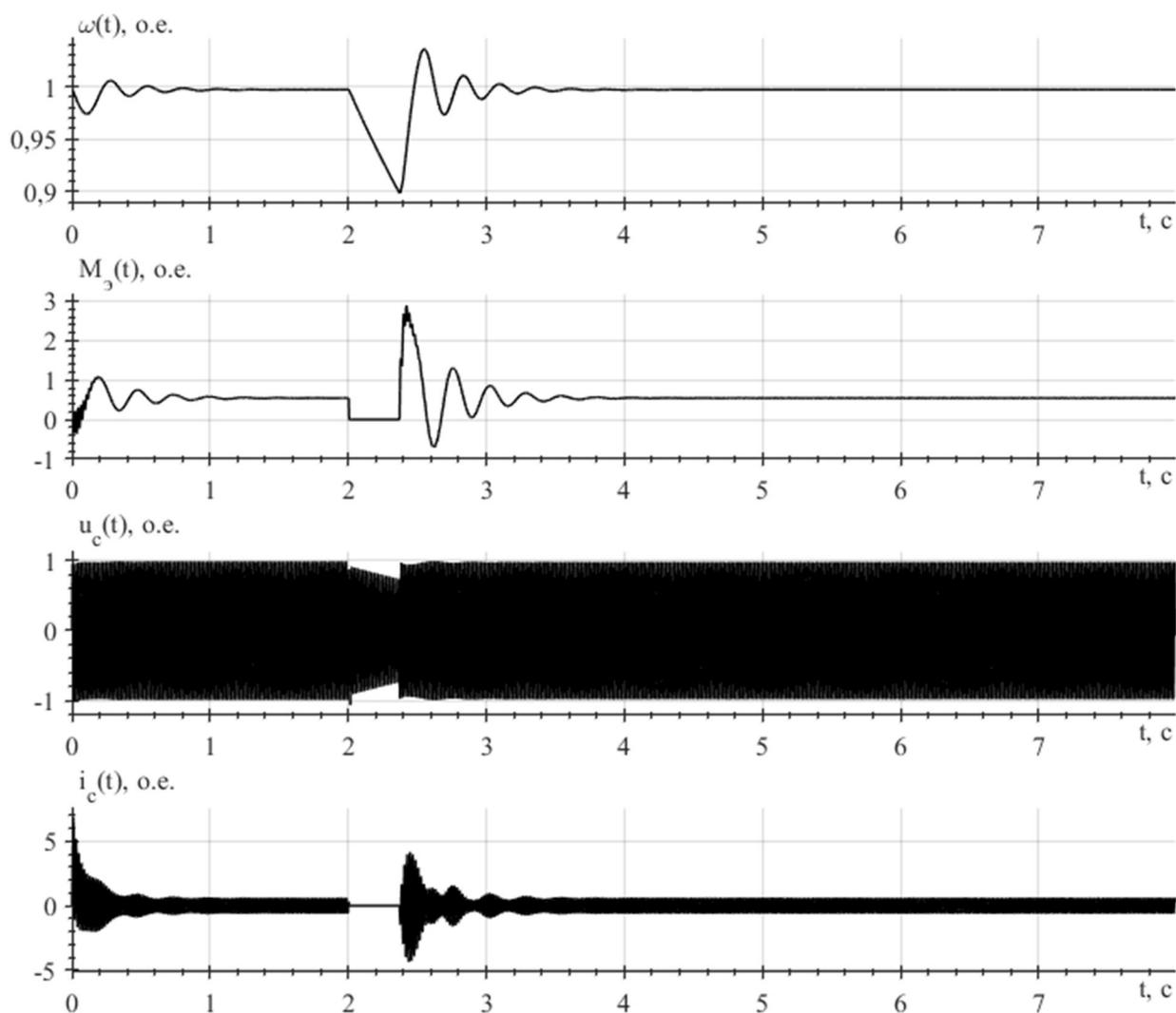


Рисунок 2.19 – Электромеханические и электрические переходные процессы двигателя, Опыт 3

Графики переходных процессов, представленные на рисунке 2.19

демонстрируют наличие бросков по моменту и току двигателя, превышающие предельно допустимые значения.

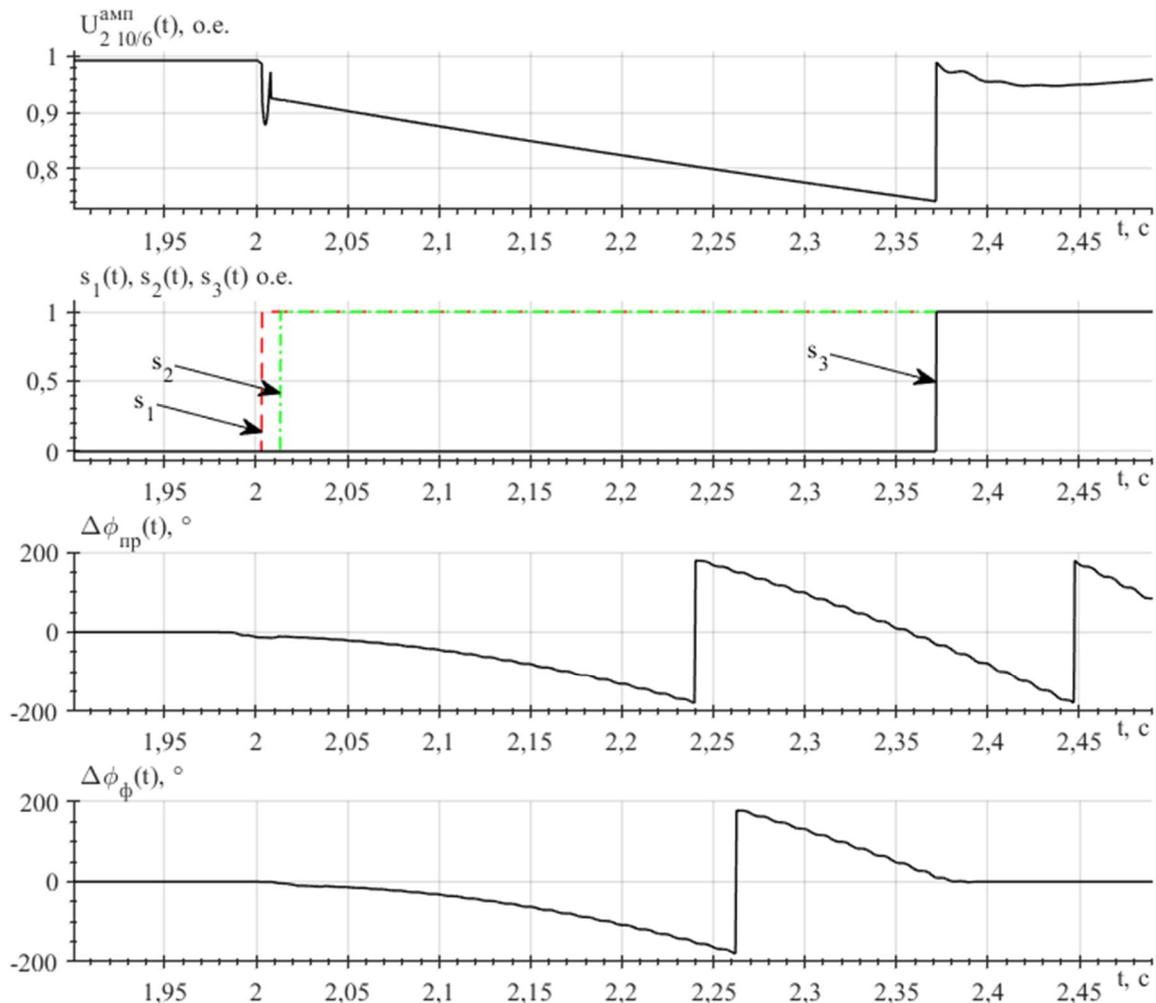


Рисунок 2.20 – Переходные процессы переменных системы управления (укрупненно момент включения), Опыт 3

По графикам переходных процессов можно констатировать затягивание момента включения секционного выключателя в связи с малым диапазоном допустимого фазового рассогласования, который определен за пределами критической длительности не срабатывания БАПР. В случае попадания в «коридор», определенный исходными данными, сразу после срабатывания выключателя основной сети (сигнал S_2) не было получено значительного снижения ударных значений тока и момента в сравнении с Опыт 2, а лишь уменьшено время протекания максимального тока до выхода координат состояния двигателя на

установившийся режим.

Опыт 4.

Исходные данные:

1. Система управления определяет аварийную ситуацию, если напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается более, чем на 10 %;
2. Время возникновения аварии – на 2-ой секунде;
3. Диапазон допустимого рассогласования фаз ± 5 градусов от нулевого значения.

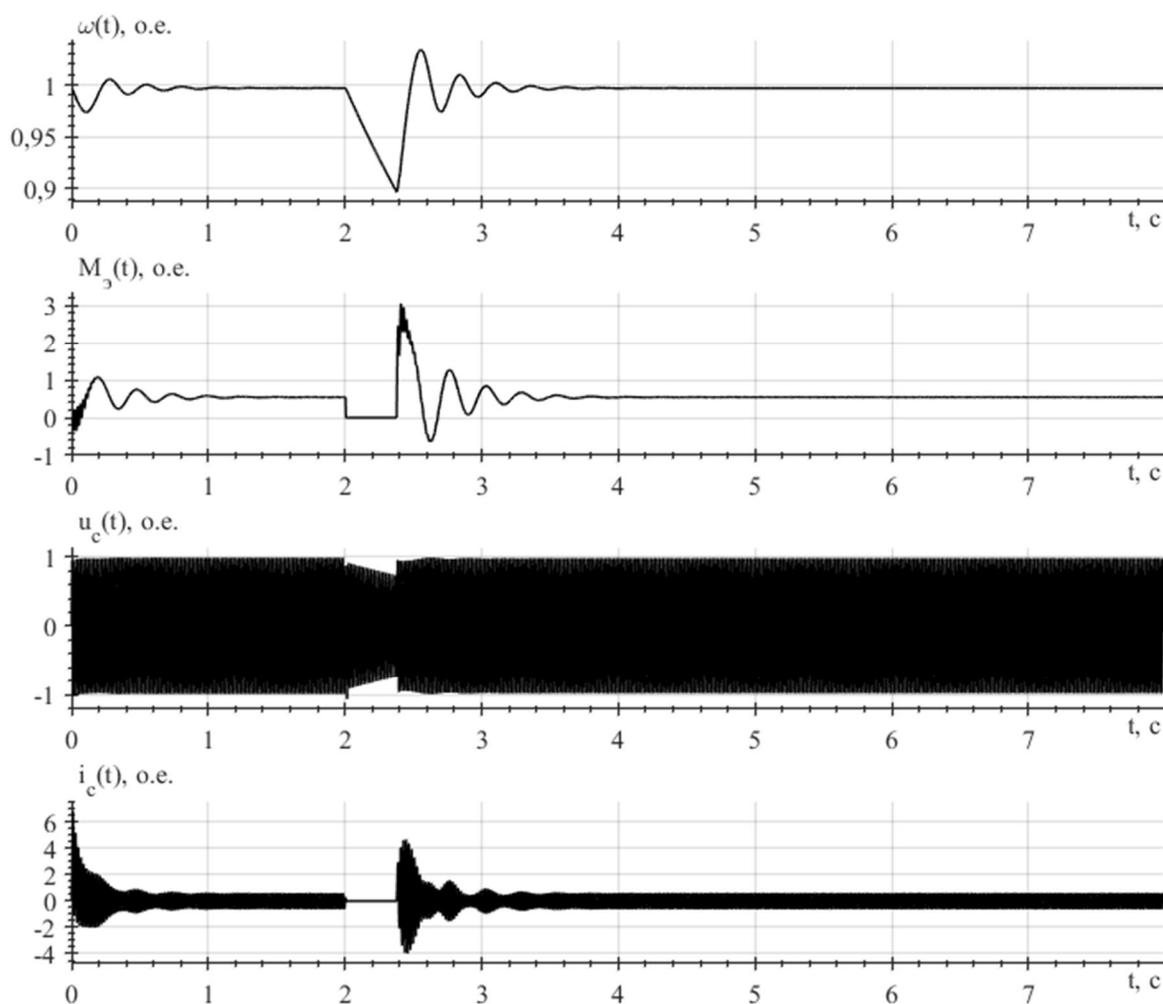


Рисунок 2.21 – Электромеханические и электрические переходные процессы двигателя, Опыт 4

Переходные процессы, представленные на рисунке 2.21 находят свое отражение в аналогичных закономерностях, приведенных для рисунка 2.19, а

именно значительным броскам значений момента и тока двигателя.

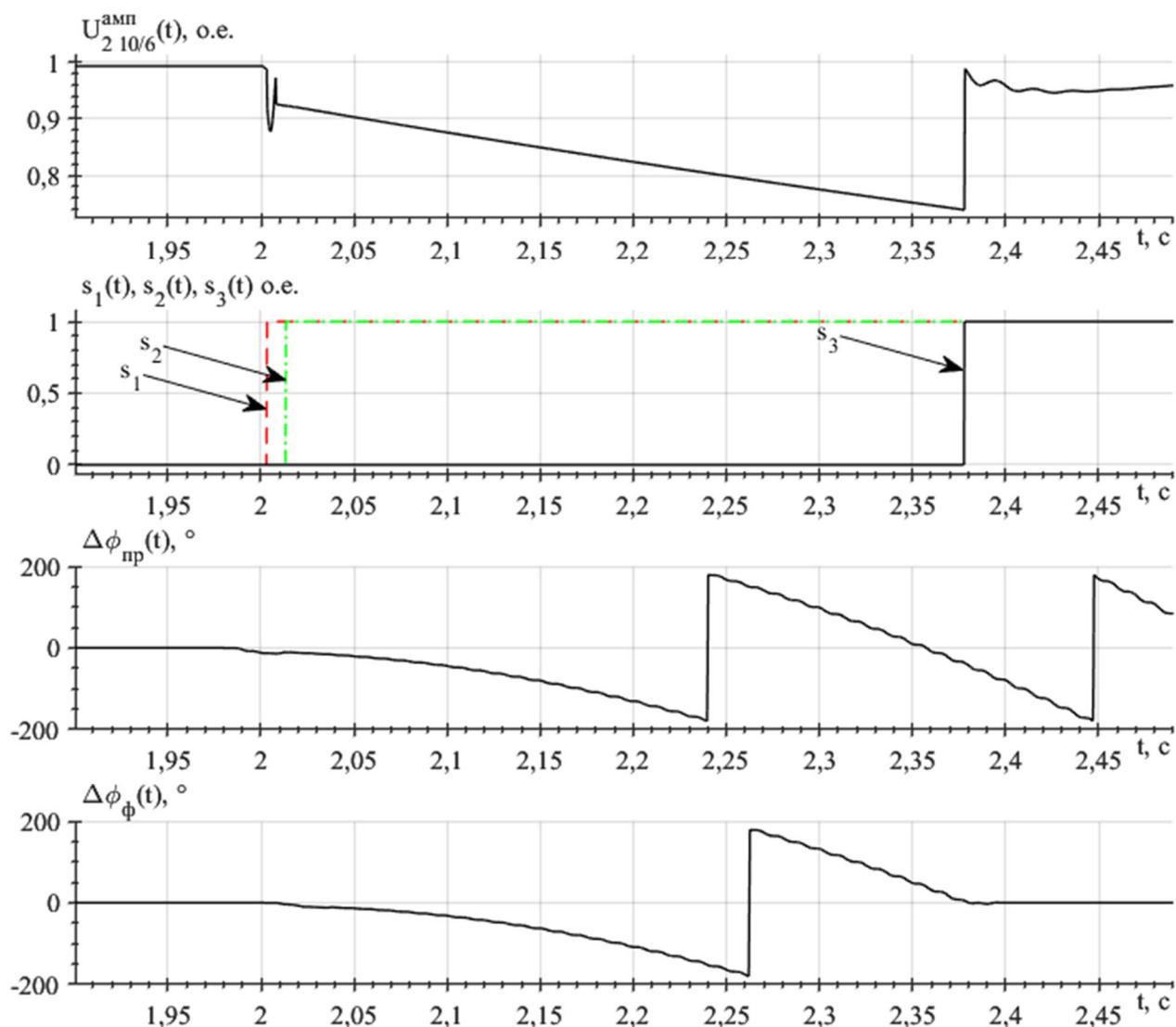


Рисунок 2.22 – Переходные процессы переменных системы управления (укрупненно момент включения), Опыт 4

На рисунке 2.22 можно наблюдать процессы, аналогичные приведенным на рисунке 2.20, а именно позднее определение допустимой точки на включение секционного выключателя.

2.5.5 Переключение нагрузки при восстановлении работоспособности основной сети

При восстановлении параметров основной сети, амплитуда напряжений

обеих сетей одинакова, но имеется фазовое рассогласование. Производится вычисление разницы фаз между питающими сетями, определяется момент нулевого фазового рассогласования, являющейся точкой идеального включения. Нулевое фазовое рассогласование повторяется каждый период, и сигнал конечного автомата на отключение/включение выключателей должен быть сформирован через время: $n \cdot \pi - (t_1 + t_2)$, где $n \cdot \pi$ – ближайшее целое число периодов к суммарному времени срабатывания обоих выключателей, t_1 – время отключения секционного выключателя, t_2 – время включения выключателя основной сети. С учетом данного времени от момента нулевого фазового рассогласования, окончательный процесс переключения нагрузки придется на одну из последующих точек идеального включения (или допустимый разрешенный диапазон относительно этой точки). Таким образом процесс работы электротехнического комплекса может выполняться циклически.

Следующий раздел посвящен перспективам использования исследуемой системы БАВР, построенной на основе опыта выбега АД.

2.6 Перспективы использования системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва, построенной на основе опыта выбега асинхронного двигателя

Электротехнический комплекс с быстродействующим автоматическим вводом резерва, система управления которым построена на опыте выбега асинхронного двигателя, может быть реализована при использовании математического и алгоритмического аппарата нейронных сетей. Речь в частности идет о прогнозировании поведения системы с использованием глубокого обучения. Ниже приведен пример и порядок действий, как прогнозировать данные временных рядов с использованием сети *long short-term memory (LSTM)*.

Сеть *LSTM* – это рекуррентная нейронная сеть (*RNN*), которая обрабатывает входные данные путем зацикливания по временным шагам и обновления состояния сети. Сеть содержит информацию сохраненных состояний за все предыдущие

временные шаги. Имеется возможность использовать сеть *LSTM* для прогнозирования последующих значений временного ряда или последовательности, используя предыдущие временные шаги в качестве входных данных.

Существует два метода прогнозирования: прогнозирование по разомкнутому и замкнутому циклам:

- Прогнозирование по разомкнутому циклу предсказывает следующий временной шаг в последовательности, используя только входные данные. При составлении прогнозов для последующих временных шагов истинные значения собираются из источника данных и используются в качестве входных значений. Например, предположим, что есть необходимость предсказать значение на временном шаге t для последовательности с использованием данных, собранных на временных шагах с 1 по $t-1$. Чтобы делать прогнозы для временного шага $t+1$, необходимо записать истинные значения данных для временного шага t и использовать их в качестве входных для следующего прогноза. Прогнозирование по разомкнутому циклу целесообразно использовать, когда имеются истинные значения, которые нужно предоставить нейронной сети перед выполнением следующего прогноза.

- Прогнозирование по замкнутому циклу предсказывает последующие временные шаги в последовательности, используя предыдущие прогнозы в качестве входных данных. В этом случае модель не требует истинных значений для выполнения прогноза. Например, предположим, что есть необходимость в предсказании значения для временных шагов t через интервал $t+k$ (где $k \in [1; i]$) для последовательности с использованием данных, собранных на временных этапах с 1 по $t-1$. Чтобы сделать прогнозы для временного шага i , необходимо использовать уже спрогнозированное значение для временного шага $i-1$ в качестве входных данных. Прогнозирование по замкнутому циклу целесообразно использовать для прогнозирования нескольких последующих временных шагов или, когда нет истинных значений, которые нужно предоставить нейронной сети перед

выполнением следующего прогноза.

На рисунке 2.23 показан пример последовательности с предсказанными значениями с использованием прогнозирования по замкнутому циклу.

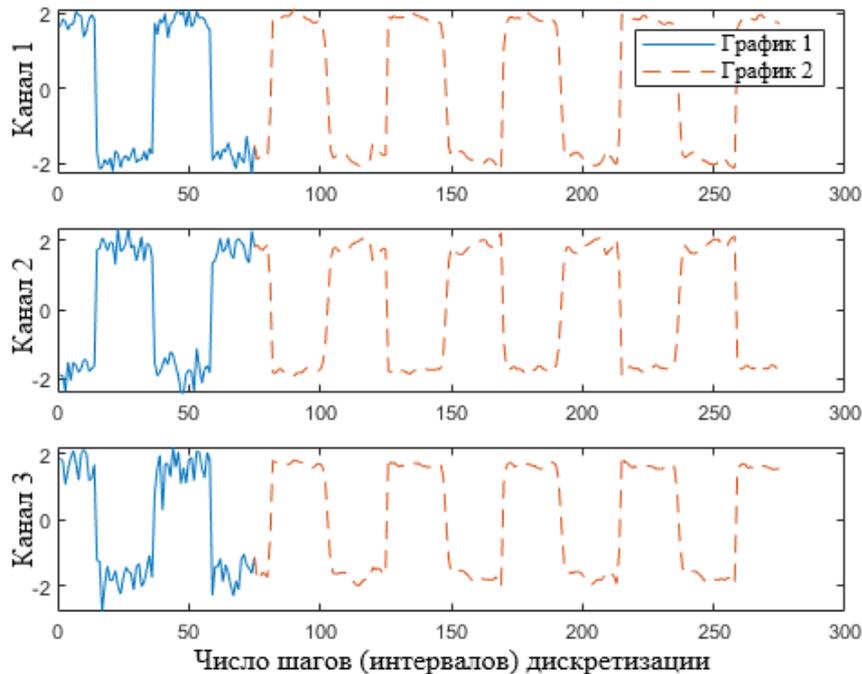


Рисунок 2.23 – Прогнозирование по замкнутому циклу (График 1, сплошная линия – входные значения, График 2, пунктирная линия – прогнозируемые значения)

В рассмотренном выше примере используется набор данных формы кривой, который содержит 2000 синтетически сгенерированных сигналов различной длины с тремя каналами. В примере сеть *LSTM* обучается прогнозированию будущих значений сигналов с учетом значений предыдущих временных шагов, используя как прогнозирование по замкнутому циклу, так и по разомкнутому циклу.

Ниже приведена последовательность действий, которую необходимо совершить для обучения системы.

Первый шаг – загрузка данных для обучения.

Необходимо загрузить данные, которые могут представлять собой массив последовательностей. Чтобы обучить сеть, каждая последовательность должна иметь одинаковое количество каналов. Данные разделяются на обучающие и

тестовые. Одна часть наблюдений используются для обучения, другая – для тестирования.

Второй шаг – подготовка данных для обучения.

Чтобы спрогнозировать значения будущих временных шагов последовательности, необходимо указать цели в качестве обучающих последовательностей со значениями, сдвинутыми на один временной шаг. Предикторы – это обучающие последовательности без конечного временного шага. Для лучшей настройки и предотвращения расхождений в обучении необходимо нормализовать предикторы и целевые показатели так, чтобы они имели нулевое среднее значение и единичную дисперсию. При формировании прогнозов, необходимо нормализовать тестовые данные, используя ту же статистику, что и данные обучения. Чтобы наиболее упростить вычисление среднего значения и стандартного отклонения по всем последовательностям, необходимо объединить последовательности во временном измерении.

Третий шаг – определение сетевой архитектуры *LSTM*.

Необходимо создать регрессионную сеть *LSTM*:

- Необходимо использовать слой ввода последовательности с размером ввода, который соответствует количеству каналов входных данных.
- Необходимо использовать слой *LSTM* со скрытыми блоками. Количество скрытых единиц определяет, какой объем информации усваивается слоем. Использование большего количества скрытых единиц измерения может дать более точные результаты, но с большей вероятностью может привести к переобучению обучающих данных.
- Для вывода последовательностей с тем же количеством каналов, что и входные данные, необходимо задействовать полностью подключенный слой с размером выходного сигнала, который соответствует количеству каналов входных данных.
- В завершении необходимо задействовать слой регрессии.

Четвертый шаг – указание вариантов обучения.

Необходимо указать параметры обучения:

- Проводить тренировки можно используя оптимизацию «*Adam*».
- Количество тренировок может достигать больших значений. Для

больших наборов данных, количество тренировок может быть уменьшено для получения приемлемого результата.

- Последовательности должны иметь одинаковую размерность.
- Каждый раз необходимо комбинировать данные.
- Для удобства можно включить отображение прогресса обучения на

графике и отключить подробный вывод.

Пятый шаг – обучение нейронной сети.

Необходимо обучить (рисунок 2.24) сеть *LSTM* указанным параметрам обучения, используя функцию «*Train network*».

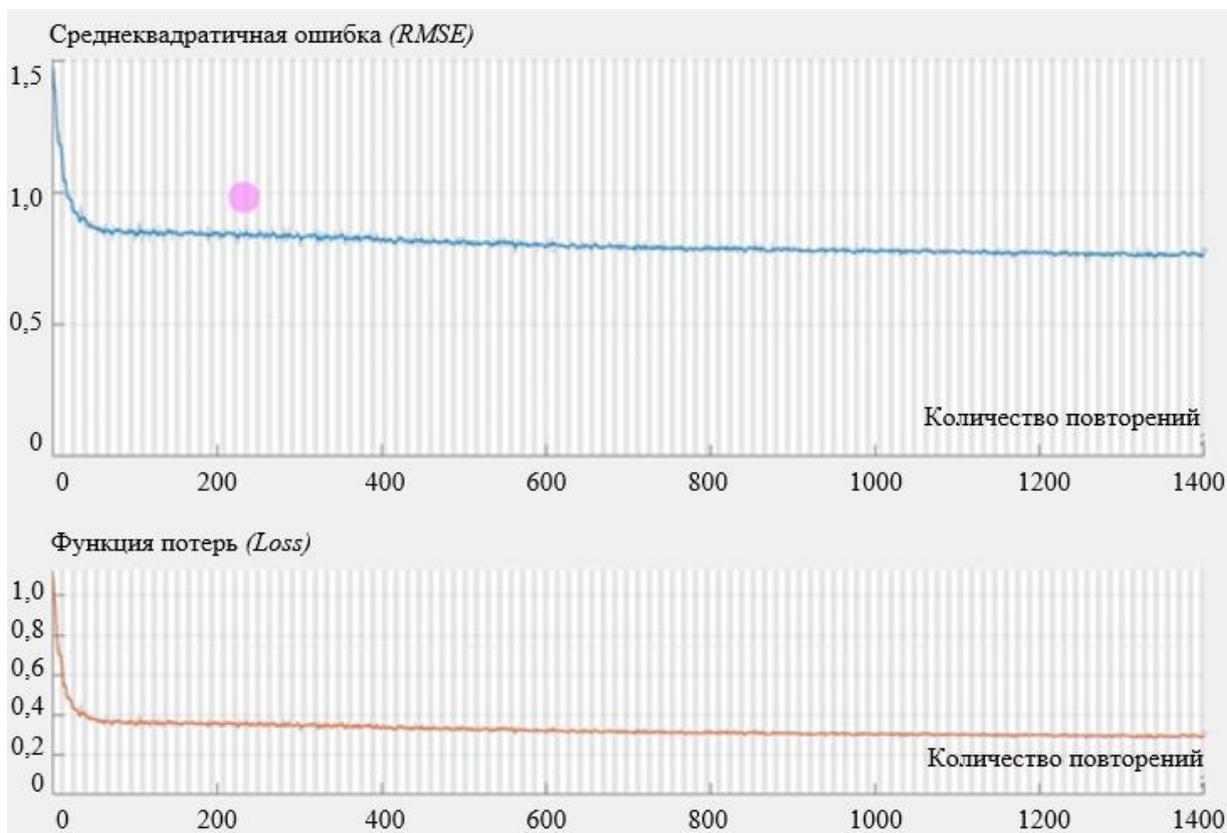


Рисунок 2.24 – Обучение сети *LSTM*

Шестой шаг – проведение теста сети.

Необходимо подготовить тестовые данные для прогнозирования, используя те же шаги, что и для обучающих данных. Также необходимо нормализовать тестовые данные, используя статистику, рассчитанную на основе обучающих данных. Цели целесообразно указать, как тестовые последовательности со значениями, сдвинутыми на один временной шаг, а предсказатели – как тестовые последовательности без конечного временного шага. Прогнозы необходимо осуществлять, используя тестовые данные. Указываются те же параметры заполнения, что и для обучения. Чтобы оценить точность, для каждой тестовой последовательности необходимо вычислить среднеквадратичную ошибку (*RMSE*) между прогнозами и целевым значением. Ошибки можно визуализировать в виде гистограммы. Более низкие значения указывают на большую точность. Необходимо рассчитать среднее значение *RMSE* по всем тестовым наблюдениям.

Седьмой шаг – прогнозирование будущих временных шагов.

Учитывая входной временной ряд или последовательность, чтобы спрогнозировать значения нескольких будущих временных шагов, необходимо использовать функцию «*Predict And Update State*». Для каждого последующего прогноза необходимо использовать предыдущий прогноз в качестве входных данных для функции. Для удобства возможно визуализировать одну из тестовых последовательностей на графике.

Прогнозирование может осуществляться по замкнутому либо разомкнутому циклу. Прогнозирование по замкнутому циклу позволяет прогнозировать произвольное количество временных шагов, но может быть менее точным по сравнению с прогнозированием по разомкнутому циклу, поскольку нейронная сеть не имеет доступа к истинным значениям в процессе прогнозирования.

Приведенный в данном разделе материал сочетает в себе информацию, использующуюся в примере *MathWorks* «Прогнозирование временных рядов с использованием глубокого обучения» [54].

Выводы по главе 2

Переходные процессы, соответствующие работе асинхронного электропривода при прямом пуске, характеризуются значительными бросками момента и тока на протяжении всего времени пуска. Данный динамический режим работы привода показателен с точки зрения рассмотрения переходных процессов в питающей сети. Из графиков переходных процессов следует, что при пуске электроприводов средней и большой мощности при питании их от источников соизмеримой мощности в режимах повышенного потребления тока на всех звеньях преобразования энергии происходят значительные «просадки» напряжения.

В данной главе приведены исследования, выполненные при разработке систем управления и имитационных моделей АВР и БАВР. Разработанная система управления АВР работоспособна, временные показатели удовлетворительны, но она не обеспечивает минимизации броска тока в момент переключения нагрузки на резервную сеть. Данный процесс является определяющим и требующим модернизации как аппаратной, так и алгоритмической части устройства компенсации провалов напряжения. Одним из вариантов модернизации является переход к структуре БАВР.

При разработке системы БАВР, как минимум, имеется две возможности выбора при организации системы управления – использование релейных элементов и ключей при составлении логики, либо использование программного кода (области *matlab* «*stateflow*») для этой же задачи. У каждого варианта есть свои преимущества и недостатки, но программный подход при исследовании показал свою практическую перспективу.

Из анализа, проведенных во второй главе опытов по исследованию разработанной системы управления, можно сделать следующие выводы.

Исходными данными для всех опытов являются следующие параметры: уставка просадки напряжения питающей сети, время возникновения аварии и диапазон допустимого рассогласования фаз.

Уменьшение «коридора» допустимого рассогласования фаз ниже ± 15

электрических градусов является нецелесообразным (по причине возможного пропуска алгоритмом управления разрешенного момента переключения). Таким образом, «коридор» рассогласования фаз ± 15 электрических градусов предварительно является оптимальным, так как при дальнейшем увеличении диапазона качество процессов будет только ухудшаться. Наибольшее влияние на величины максимального момента и тока статора при переключении, оказывают уставка по напряжению, с помощью которой определяется состояние аварийной ситуации, и инерционность коммутирующих аппаратов. Эти два фактора определяют общую задержку срабатывания БАВР. Общее время задержки напрямую определяет разницу мгновенных значений между напряжением питающей сети и ЭДС двигателя. При выходе за границы критической временной задержки, определяющейся моментом фиксации снижения напряжения, задержкой на отключение выключателя питающей сети и включение секционного выключателя, с начала обнаружения аварии, максимальные броски тока и момента не могут быть скорректированы алгоритмом работы БАВР.

Таким образом рекомендуется использовать разработанный алгоритм БАВР, если общая задержка на его срабатывание не превышает пяти периодов питающего напряжения.

Другим вариантом повышения быстродействия определения аварийного состояния в следствие просадки напряжения, является анализ темпов снижения (производной) амплитуды этого напряжения.

Основным результатом разработки и исследования, проведенных в главе 2 диссертационной работы, является устранение недостатков существующих систем управления АВР, главный из которых – несогласованность на этапе переключения фазы напряжения затухающей ЭДС двигателя и фазы напряжения сети, к которой осуществляется подключение.

Результаты исследования разработанных алгоритмов управления УКПН обеспечивают не превышение бросков по моменту и току двигателя не более, чем 1,5 от M_n и не более, чем 1,8 от I_n соответственно, что не превышает предельно допустимые значения.

Разработанная система управления БАПР, построенная на основе выбега двигателя имеет удовлетворительные показатели качества. Но у предложенного решения также есть недостатки – зависимость конечного желаемого результата от состояния, в котором находится фаза резервной сети и неучет возможных случайных отклонений координат состояния электропривода системой автоматического управления БАПР.

Первый недостаток связан с тем, что ближайшая разрешенная точка на включение, находящаяся внутри «коридора» ± 15 градусов, может располагаться за пределами критической длительности выбега АД, и алгоритмом БАПР скорректировать работу электромеханической системы не представляется возможным (в любом случае будет получен существенный ударный ток/момент).

Второй недостаток связан с невозможностью получить единственно истинный график переходного процесса ЭДС двигателя при его выбеге в связи с возникающими случайными отклонениями, как электрических, так и механических параметров электропривода в процессе его работы (температурные изменения активного сопротивления обмотки статора, магнитного состояния в воздушном зазоре двигателя, изменение температуры смазки подшипников вала двигателя и т.д.). Таким образом, к выбранному и изначально принятому оптимальным диапазону ± 15 градусов разницы фаз добавится случайная неконтролируемая величина, требующая компенсации.

Устранение вышеописанных недостатков возможно при помощи использования средств нейросетевого обучения и нечеткой логики.

Расширение функциональных возможностей проектируемых устройств компенсации провалов напряжения, а также повышение эксплуатационных характеристик ответственных потребителей электрической энергии в аварийных режимах работы, делает необходимым модернизацию разработанных и исследованных в диссертационной работе алгоритмов и систем управления. Подробно это будет рассмотрено в главе 3.

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1 Анализ типа накопителя электрической энергии и расчет его энергоемкости

Использовать накопитель в разрабатываемой системе компенсации провалов напряжения может следующим образом.

Место включения накопителя – это потенциально аварийный участок системы электроснабжения ответственного потребителя электрической энергии (в разрабатываемом и исследуемом случае, это место подключения секционного выключателя). Накопитель находится в режиме «ожидания», заряжается в то время, когда работа системы электроснабжения предприятия идет штатно. Во время возникновения аварийной ситуации накопитель включается в работу и выдает энергию в питающую сеть. Наблюдается процесс замещения электрической сети накопителем энергии взамен основной сети, отключенной аварийно.

Алгоритм функционирования разрабатываемого устройства следующий. При возникновении аварии в системе электроснабжения ответственного потребителя, основная сеть выключается и в работу вступает накопитель энергии, замещающий питающую сеть. Как только заряда накопителя становится недостаточным для обеспечения функционирования потребителя в номинальном режиме работы, осуществляется переключение нагрузки на резервную сеть. Накопитель и резервная сеть в установившихся режимах одновременно не работают. Однако, для поддержания технологических переменных нагрузки в допустимых безаварийных пределах, в коммутационно-переходных режимах совместная работа накопителя и резервной сети допускается [55].

Технические преимущества предложенного алгоритма действий:

1. Компенсация кратковременной пропажи напряжения питания;
2. Обеспечение антидребезга системы электроснабжения тогда, когда

технически не рационально осуществлять переключение нагрузки с основной сети на резервную.

Естественно, в виду ограниченной энергоемкости, накопителем полностью заменить питающую сеть не представляется возможным. Емкость аккумуляторных батарей выбирается исходя из конкретных требований по времени автономной работы нагрузки. Если же время нарушения работы в основной сети превышает нормированные значения, то появляется необходимость использования резервной сети [56].

В качестве накопителя, использующегося в настоящем диссертационном исследовании предлагаются к рассмотрению суперконденсаторные модули. Применение конденсаторов в качестве накопителей энергии стало возможно в том числе благодаря появлению новых типов электролитов и электродных материалов [57].

Суперконденсатор, называемый также двухслойным конденсатором или ультраконденсатором, в противоположность типовому конденсатору имеет значительно увеличенную емкость, ее значение может достигать нескольких фарад. Использоваться суперконденсатор может в ситуациях, когда за небольшой временной отрезок необходимо обеспечить большие значения силы тока и часто сменяющиеся периоды разряда/заряда.

Улучшение конструкции суперконденсаторов непосредственно связано с применением особых типов электролитов и электродов, использующихся в электрохимических источниках тока. Выделяют два типа конденсаторов: основной электрохимический двухслойный конденсатор и асимметричный двухслойный электрохимический конденсатор. Для первого типа характерна ярко выраженная зависимость режимов работы накопителя от электростатического действия. Для второго типа такой зависимости нет, так как в его структуре применяются электроды, подобные используемым в аккумуляторных батареях, в целях получения увеличенного значения плотности энергии. Однако, особенности конструкции и принципа действия суперконденсатора второго типа, уменьшают срок его использования и проявляются в ограничениях, которые имеют

электрохимические источники тока. Перспективным является применение графена в роли материала электрода, чем и занимаются многие исследователи в настоящее время [58, 59].

При изготовлении суперконденсаторов применяются разные типы электродов, но наибольшее распространение получила топология электрохимического двухслойного суперконденсатора с органическим электролитом на базе углерода. Несомненным достоинством данного типа суперконденсатора считается простота производства.

Суперконденсатор имеет ограничение по собственному напряжению, оно варьируется в пределах 2,5-2,7 В. Увеличение данного предела возможно, но может негативно отразиться на сроке эксплуатации накопительного элемента. По этой причине для получения повышенного напряжения суперконденсаторы соединяют в последовательную цепь [60]. Но такой вариант увеличения напряжения способствует уменьшению общей емкости и повышению внутреннего сопротивления. При таком соединении (в частности, более 3 последовательных элементов) необходима дополнительная балансировка для исключения перенапряжения каждой из накопительных ячеек в отдельности. Подобным способом построена система защиты литий-ионных аккумуляторных батарей.

Удельная энергоемкость суперконденсатора колеблется от 1 до 30 Вт*ч/кг, что в 10-50 раз меньше показателя литий-ионного аккумулятора. Еще одним недостатком является кривая разряда [61]. В то время как электрохимические батареи обеспечивают постоянное напряжение в полезном диапазоне мощности, напряжение суперконденсаторов уменьшается линейно, что сокращает спектр доступной мощности.

Переходные процессы по напряжению и току приведены на рисунках 3.1 – 3.2 для режимов разряда и заряда суперконденсатора. Для заряда конденсатора, сопровождающего линейно возрастающим напряжением, нет необходимости отслеживать окончание данного процесса, так как при полностью заряженном суперконденсаторе ток проседает. Напряжение также линейно убывает при разряде конденсатора. Для стабилизации постоянного значения потребляемой мощности

при уменьшении напряжения, преобразователем будет потребляться увеличивающееся значение силы тока. Суперконденсатор будет считаться разряженным, когда работа нагрузки больше не сможет отвечать заявленным требованиям.

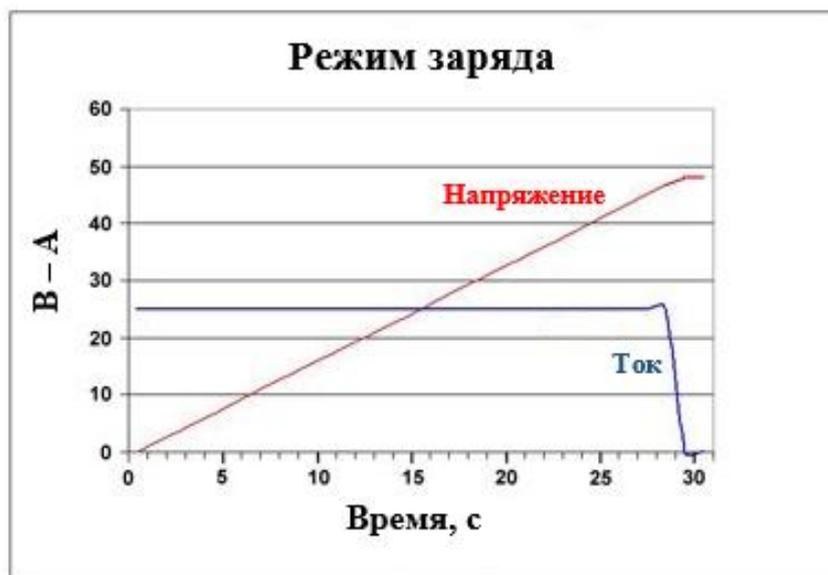


Рисунок 3.1 – Переходные процессы для напряжения и тока при заряде суперконденсатора

Рассмотренные выше процессы находят отражение на графиках переходных процессов – при постоянном значении тока, напряжение возрастает по линейной зависимости, а при полностью заряженном конденсаторе ток падает.

Напряжение накопителя падает по линейной зависимости, при использовании автономного инвертора для поддержания его выходного значения напряжения на определенном уровне будет получено увеличение значения силы тока в накопителе.

Длительность заряда суперконденсатора варьируется в пределах от 1 до 10 секунд, а его процесс имеет сходство с зарядом электрохимических батарей. Ограничения по предельному току вносит устройство заряда. Как было отмечено ранее, суперконденсатору не требуется устройство отслеживания (фиксации) окончания процесса заряда в виду того, что ток просто перестанет протекать [62].

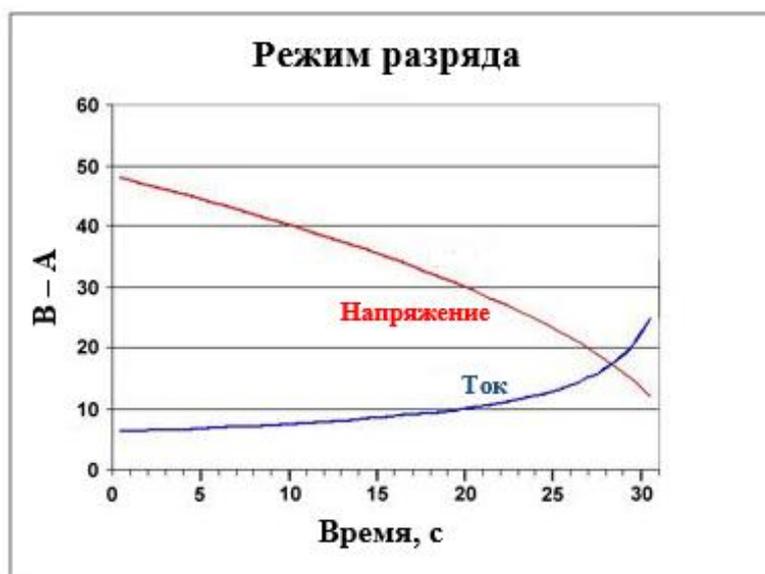


Рисунок 3.2 – Переходные процессы для напряжения и тока при разряде суперконденсатора

В таблице 3.1 приведено сравнение типовой литий-ионной батареи и суперконденсатора.

Таблица 3.1 – Технические характеристики литий-ионной батареи и суперконденсатора

Характеристики	Литий-ионная батарея	Суперконденсатор
Напряжение ячейки	3,6 В	От 2,3 до 2,75 В
Количество циклов заряда/разряда	500 и более	10^6 или $30 \cdot 10^3$
Время заряда	10-60 минут	1-10 секунд
Удельная мощность (Вт/кг)	1000-3000	До 10 тысяч
Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг)	120-240	5
Допустимый разрядный диапазон температур	От -20°C до 60°C	От -40°C до 65°C
Допустимый зарядный диапазон температур	От 0°C до 45°C	От -40°C до 65°C
Срок эксплуатации	От 5 до 10 лет	10-15 лет

Суперконденсатор способен многократно разряжаться и заряжаться. В сравнении с аккумулятором на суперконденсатор не оказывает негативного влияния циклический режим эксплуатации. Старение материалов также оказывает незначительное влияние. При правильных условиях эксплуатации емкость суперконденсатора после десяти лет остается в пределах 80 % от номинальной. Негативное влияние на срок эксплуатации могут оказать высокие напряжения. Но существенным достоинством суперконденсатора являются его рабочие температурные диапазоны, тогда как для электрохимических источников энергии это является ограничивающим фактором [63].

Отрицательным свойством суперконденсатора является его саморазряд. Причиной этого являются особенности органического электролита. Аккумулятор может терять до 5 % энергии в месяц, за это же время суперконденсатор саморазряжается наполовину.

Использование суперконденсаторов является технически рациональным решением, когда возникает необходимость в кратковременном питании нагрузки. Электрохимические батареи больше подходят для случаев длительного питания потребителей. При этом группировка двух типов накопителей энергии в один источник может позволить создать более совершенную гибридную систему.

Суперконденсаторы широко используются в случаях, когда нагрузка должна получать питание от нескольких секунд до нескольких минут, при условии быстрой очередной зарядки. Похожими свойствам обладает маховик или инерционный аккумулятор. По этой причине в некоторых случаях суперконденсатор может являться ему заменой, в частности, в транспортной сфере [64].

Одним из таких примеров являются испытания, проводимые в одном из штатов США в сфере железнодорожного транспорта. Речь идет об опытах с комплексом маховиков и суперконденсаторов мощностью около 2-2,5 МВт, необходимых для компенсации провалов напряжения при разгоне железнодорожного состава. К обеим системам предъявляются требования по организации бесперебойного электропитания определенной нагрузки в течение полуминуты, а также зарядке за аналогичный временной отрезок. Повышенные

требования при этом предъявляются к длительности периода эксплуатации при низких расходах на обслуживание и колебанию напряжения в малом диапазоне.

Активным развитием и исследованием применения суперконденсаторов занимается и Япония. Исследования проводятся на системе суммарной мощностью около 4 МВт, предназначенной для снижения нагрузки электросети во время наибольшей загруженности. Помимо этого, разработаны системы, которые обеспечивают питание нагрузки в течение определенного временного отрезка в периоды отключения основного питания и запуска генераторов.

Применение суперконденсаторам также находится и в сфере электротранспорта [65]. Способность заряжаться благодаря торможению и возможность поддержания высоких значений силы тока для ускорения способствуют применению суперконденсаторов в электрическом и гибридном транспорте.

Но суперконденсаторы имеют и определенные недостатки, связанные с довольно высокой стоимостью и низкой удельной энергоемкостью. В таблице 3.2 демонстрируются достоинства и недостатки суперконденсаторов [66].

Таблица 3.2 – Достоинства и недостатки суперконденсаторов

Плюсы	Минусы
<ul style="list-style-type: none"> • Длительный срок эксплуатации; большое количество циклов перезарядки • Большое значение удельной мощности и малое внутреннее сопротивление обеспечивают высокие токи нагрузки • Быстрый процесс зарядки, который прекращается самостоятельно • Стабильно работает на низких температурах 	<ul style="list-style-type: none"> • Малая удельная энергоемкость • Линейная зависимость уменьшения напряжения препятствует использованию всей накопленной энергии • Сильный саморазряд • Небольшое значение напряжения ячейки • Большая стоимость 1 Вт энергии

Накопитель, применяемый для разработки в настоящем диссертационном исследовании, представляет собой каскад последовательно-параллельного соединения суперконденсаторов. Для выбора конкретного типа суперконденсаторных модулей необходимо определить требования по мощности и энергоёмкости для исследуемой системы электроснабжения предприятия, которые в свою очередь зависят от режимов работы нагрузки.

Для питания выбранной к исследованию нагрузки от накопителя потребуется не один суперконденсаторный модуль, а каскад из них. Каскад необходимо сформировать по схеме последовательно-параллельного соединения накопительных модулей между собой, чтобы с одной стороны получить нужное значение выходного напряжения, а с другой стороны обеспечить требуемую энергоёмкость. Зададимся исходными данными: для работы в режиме ИБП требуемая активная мощность составляет 1000 кВт, время работы – 5 секунд.

В таблице 3.3 приведены марки суперконденсаторных модулей производства компании ООО «ТЭЭМП Производство», которые можно использовать для компоновки единого накопителя.

Таблица 3.3 – Суперконденсаторные модули фирмы «ТЭЭМП Производство»

Наименование	Ёмкость, Ф	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Эквивалентное последовательное сопротивление, МОм
<i>МО-225V16F-0</i>	17,31	210,6	100	31,2
<i>ММ-48V167F-0</i>	166,67	48	80	3,24
<i>МО-75V50F-0</i>	50	75	100	10,8
<i>МО-110V18F-0</i>	21,43	113,4	100	25,2
<i>МО-75V100F-0</i>	100	81	300	5,4
<i>МО-150V53F</i>	53,5	151,2	100	10,2
<i>МО-162V50F-0</i>	50	162	200	10,8

Приведенный ниже расчет представляет собой совокупность общеизвестных формул электростатики, дополненных логическими умозаключениями, и результатами работы по экспериментальным исследованиям токов заряда-разряда в суперконденсаторах [67].

Количество конденсаторов, соединённых последовательно в один стринг, выбирается, исходя из номинального напряжения конденсаторов и диапазона напряжения на стороне постоянного тока преобразователя, и рассчитывается по формуле

$$n_{\text{посл}} \geq \frac{U_{dc}}{U_{scap}}, \quad (3.1)$$

где U_{dc} – напряжение на стороне постоянного тока преобразователя, U_{scap} – номинальное напряжение суперконденсатора.

Количество стрингов, соединённых параллельно выбирается исходя из того, какую мощность и энергоёмкость необходимо обеспечить для работы устройства компенсации провалов напряжения (УКПН). При расчёте энергоёмкости необходим учет КПД подсистемы распределения, подсистемы преобразования, подсистемы накопления энергии, а также количество потребляемой электроэнергии на собственные нужды УКПН.

Энергия, запасаемая суперконденсаторным стрингом $E_{стр}$, рассчитывается как:

$$E_{стр} = \frac{(U_{DCmax}^2 - U_{DCmin}^2) \cdot C_{scap} / n_{\text{посл}}}{2 \cdot 3600 \text{ с}}, \quad (3.2)$$

где C_{scap} – ёмкость суперконденсатора.

КПД подсистемы распределения и преобразования энергии зависит от параметров преобразователя и согласующего трансформатора. Общий КПД для двух подсистем обычно составляет 94 – 97 %. КПД подсистемы накопления

энергии зависит от параметров модулей, а также от тока, протекающего по ним во время заряда/разряда. Суперконденсаторы имеют внутреннее активное эквивалентное последовательное сопротивление, через которое при заряде протекает электрический ток, в результате чего выделяются тепловые потери. Рассеиваемая энергия на суперконденсаторе во время процесса разряда/заряда $\Delta E_{стр}$ и КПД одного стринга $\eta_{стр}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta E_{стр} = \frac{R_{эпс} \cdot \int_0^{t_{p/3}} i(t)^2 dt}{3600 \text{ с}}, \quad (3.3)$$

где $R_{эпс}$ – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, i – ток разряда/заряда суперконденсатора, $t_{p/3}$ – время заряда/разряда суперконденсатора.

На малых временах зависимость тока от времени близка к закону растянутой экспоненты.

$$\eta_{стр} = \frac{E_{стр} - \Delta E_{стр}}{E_{стр}}. \quad (3.4)$$

КПД всей подсистемы накопления энергии $\eta_{пн}$ равен КПД одного стринга $\eta_{стр}$. Количество стрингов подключённых параллельно рассчитываются как:

$$n_{стр.} \geq \frac{E_{треб}}{\eta_{пн} \cdot \eta_{пр} \cdot \eta_{пп} \cdot E_{стр}}, \quad (3.5)$$

где $\eta_{пр}$ – КПД подсистемы распределения энергии, $\eta_{пп}$ – КПД подсистемы преобразования энергии, $E_{треб}$ – требуемая энергоёмкость, которая определяется исходя из режима ИБП для УКПН.

$$E_{треб} = P_{треб} \cdot t_{ибп}. \quad (3.6)$$

где $t_{убн}$ – время при работе накопителя в режиме ИБП, $P_{треб}$ – требуемая активная мощность.

При выборе количества суперконденсаторов необходимо также обеспечить требование по току для модулей подсистемы накопления энергии. Ток в одном стринге не должен превышать определённого значения, исходя из необходимого количества циклов заряда/разряда. Для суперконденсаторов производства компании ООО «ТЭЭМП Производство» с номинальным током 100 А зависимость количества циклов заряда/разряда от тока приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Зависимость количества циклов заряда/разряда от тока

Ток, кА	Количество циклов, тыс. шт.
0,1	∞
0,5	500
1	10

Максимальный ток в одном стринге за весь цикл заряда разряда рассчитывается как:

$$I_{max} = \frac{P_{треб.}}{U_{min} \cdot n_{стр}} \quad (3.7)$$

Необходимое количество циклов заряда/разряда для УКПН выбирается, исходя из частоты провалов напряжения и необходимого срока службы устройства. Для длительной работы УКПН (10-20 лет) достаточно 1 500 - 3 000 циклов заряда/разряда.

Для обеспечения наибольшего срока эксплуатации обычно стараются не превышать значение тока, протекающего через суперконденсатор, больше 1000 А. Также на срок службы суперконденсаторов влияет напряжение на суперконденсаторе и температура окружающей среды. Если второе можно обеспечить за счёт инженерных подсистем УКПН, поддерживающих

определённую температуру, то первое условие длительной эксплуатации, связанной с напряжением, можно осуществить за счёт правильного выбора количества последовательно-соединённых конденсаторов, а также за счёт системы *BMS (Battery Management System)*, которая не допускает перезаряда модулей, а также не допускает существенного различия напряжений на них.

Для мощности нагрузки в 1000 кВт и времени работы 5 секунд рассчитанные параметры для каждой марки суперконденсатора приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Выбор модулей для подсистемы накопления

Наименование	$n_{\text{посл.}}$, шт.	КПД стринга, %	Энергоёмкость стринга, кВт*ч	$n_{\text{стр.}}$, шт.	Кол-во супер-конденсаторов, шт	I_{max} , А
<i>MO-225V16F-0</i>	4	0,997	0,087	13	52	151,7
<i>MM-48V167F-0</i>	14	0,998	0,239	6	84	328,6
<i>MO-75V50F-0</i>	9	0,997	0,112	13	117	151,7
<i>MO-110V18F-0</i>	6	0,993	0,072	19	114	103,8
<i>MO-75V100F-0</i>	8	0,998	0,251	6	48	328,6
<i>MO-150V53F</i>	5	0,998	0,215	6	30	328,6
<i>MO-162V50F-0</i>	4	0,998	0,251	6	24	328,6

Из таблицы 3.5 следует, что для всех суперконденсаторных модулей максимальный ток через стринг не превышает 1 кА.

Для составления варианта компоновки УКПН в имитационной модели примем параметры суперконденсаторного модуля модели *MO-162V50F-0*.

3.2 Имитационное моделирование алгоритмов управления устройством компенсации провалов напряжения с накопителем электрической энергии

3.2.1 Переключение нагрузки на накопитель энергии

В варианте использования накопителя электрической энергии в качестве первичного резервного источника, как и в случае переключения нагрузки на резервную сеть, должны выполняться все режимы синхронизации включения [68]. То есть, в нормальном режиме работы система управления накопителем должна следить за работой сети, в которую он может включиться. Для этой цели применима уже разработанная в диссертации логика работы системы БАВР («коридор» включения, предсказание состояния выбегающей ЭДС двигателя и т.д.).

При фиксации аварии в основной питающей сети нагрузка переводится на накопитель электрической энергии, который в данном режиме работает как ИБП. По достижению разряда накопителя уставки критического значения напряжения, осуществляется переключение нагрузки на резервную сеть. Это можно осуществить, как минимум, двумя вариантами. Первый связан с использованием выключателя, подобного используемым выключателям основной или резервной сети. Второй вариант связан с закрытием инвертора накопителя, остановкой его работы, что приведет к завершению процессов перетока энергии.

Система управления накопителем и подсистема управления логикой переключения нагрузки с основной сети на накопитель и резервную сеть представлены в Приложении В (рисунок В.9). В состав данной системы входят 6 структур управления.

Аварийная ситуация в имитационной модели системы электроснабжения создается искусственно путем отключения вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ от основной нагрузки. Время возникновения аварийной ситуации – на 2-ой

секунде от начала моделирования. На рисунке 3.3 располагаются графики переходных процессов логических состояний системы управления (S_1 – возникновение аварии, S_2 – обнаружение аварии системой управления, S_3 – отключение выключателя основной сети, S_4 – включение/отключение выключателя накопителя, S_5 – включение секционного выключателя).

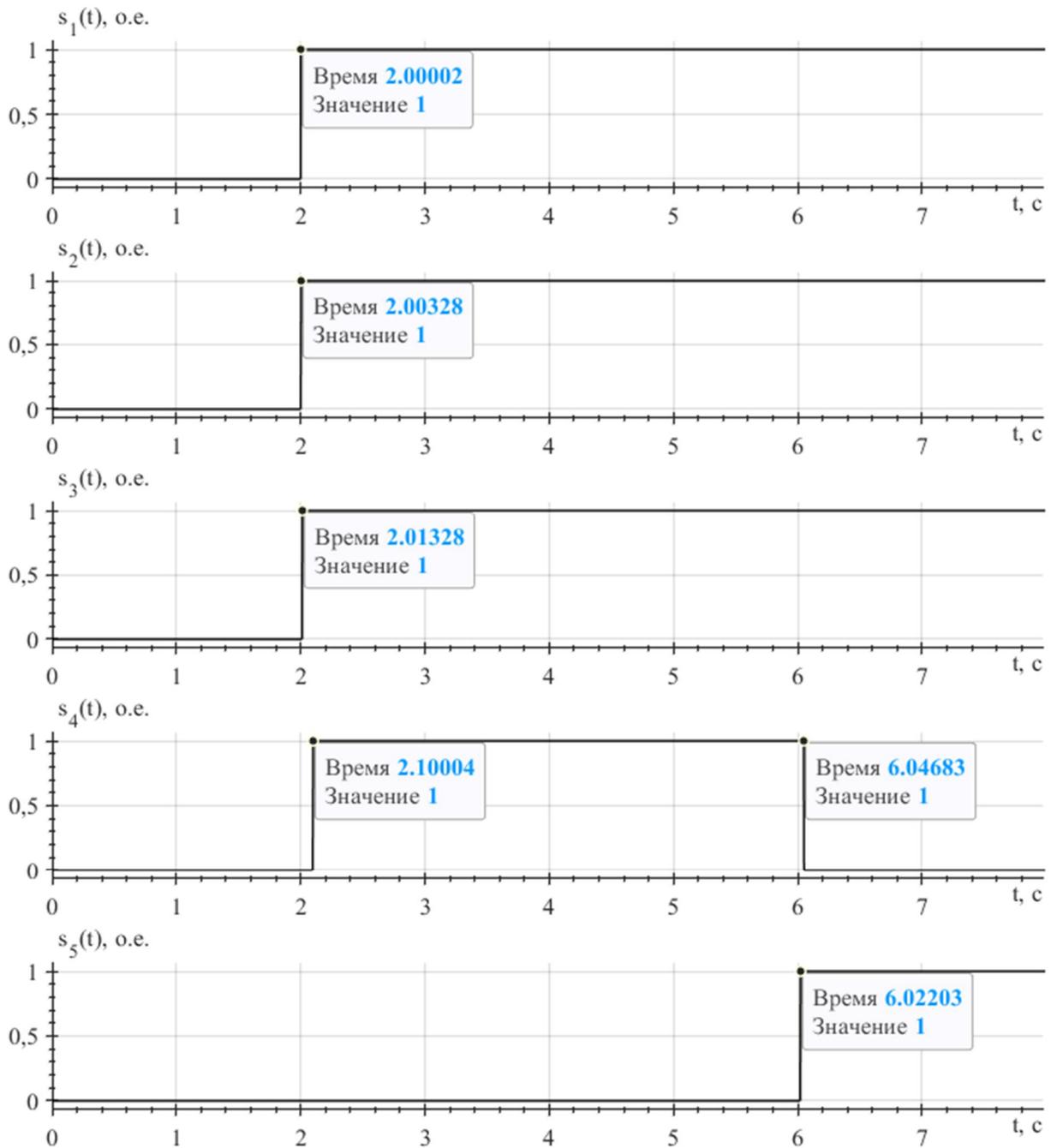


Рисунок 3.3 – Графики переходных процессов логических состояний системы управления

Определение аварийной ситуации и дальнейшее управление переменными технологического процесса ответственного механизма осуществляется при помощи структур СУ (рисунки 3.4 – 3.8).

В соответствии с рисунком 3.4 с помощью блока «*Sinusoidal Measurement*» осуществляется извлечение сигналов частоты, фазы и амплитуды из трехфазных сигналов датчиков напряжений статора двигателя основной сети и вторичной обмотки трансформатора 10/6 кВ резервной сети. Впоследствии эти сигналы используются для осуществления синхронизации фаз затухающей ЭДС аварийной нагрузки, возникающей в следствие выбега насоса и напряжения резервной питающей сети.

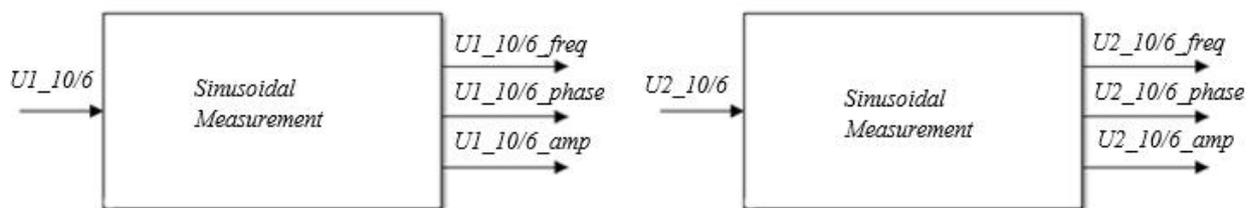


Рисунок 3.4 – Подсистема выделения частоты, фазы и амплитуды из измеряемых напряжений

Алгоритм управления, сформированный в подсистеме логики переключения нагрузки с основной сети на накопитель имеет следующую последовательность действий, которая в том числе отображена на рисунке 3.5:

1. Блок системы управления имеет 6 выходных сигналов (*trigger*, *to_invertor*, *section_main_off*, *initial_phase*, *initial_amp*, *initial_freq*), которые на старте имитационного моделирования устанавливаются в нулевые начальные значения.

2. Если входная переменная $amp < 0,90$, что означает снижение амплитуды напряжения основной сети на 10 % и более, состояние меняется на блок «*drop_detected*» и выходная переменная *trigger* устанавливается в значение 1, что в свою очередь означает обнаружение просадки напряжения основной сети.

3. По обнаружению просадки выполняется блок *off_main_line*.

Переменная *section_main_off* устанавливается в значение 1, тем самым отключая основную (аварийную) сеть. Тем самым двигатель и насос находятся в состоянии выбега.

4. В любой наиболее подходящий промежуток времени (формирующийся из условия минимума фазового рассогласования выбегающей ЭДС и выходного напряжения накопителя энергии) осуществляется подключение инвертора накопителя к выбегающей нагрузке. Данная функция осуществляется подсистемой, представленной далее (рисунок 3.8), которая заведомо обеспечивает синхронизацию фазы ЭДС нагрузки с выходным напряжением синусного фильтра инвертора. Для текущего эксперимента время включения выбрано 2,1 секунды.

5. Для дальнейшего восстановления амплитуды, частоты и фазы напряжения на выходе синусного фильтра инвертора блоки *mem_the_phase*, *mem_the_amp* и *mem_the_freq* фиксируют начальные значения соответственно фазы, амплитуды и частоты при включении накопителя в сеть.

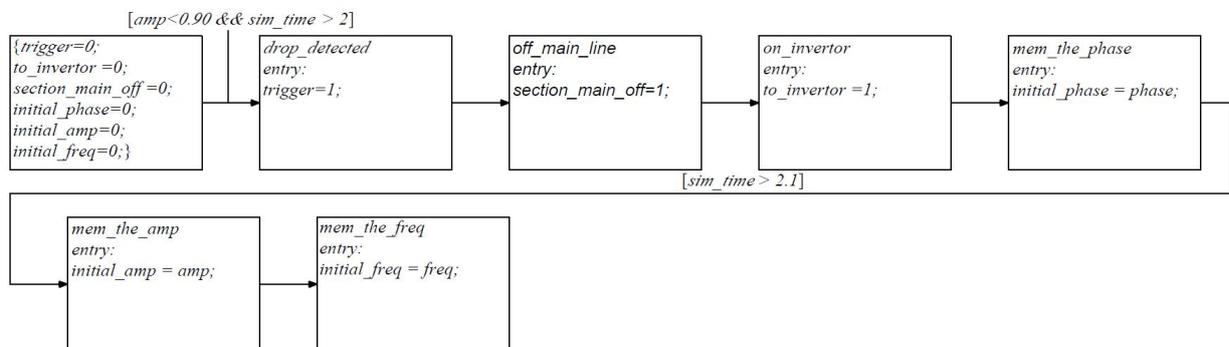


Рисунок 3.5 – Функциональная схема алгоритма логики управления накопителем

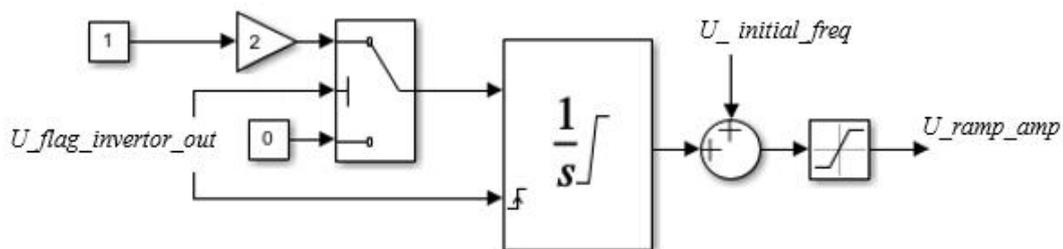


Рисунок 3.6 – Структурная схема формирования амплитуды напряжений инвертора при переключении нагрузки с аварийной сети на накопитель

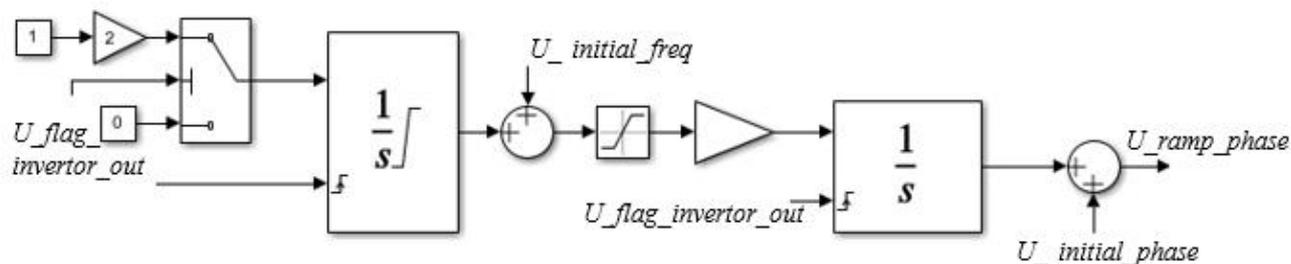


Рисунок 3.7 – Структурная схема формирования частоты и фазы напряжений инвертора при переключении нагрузки с аварийной сети на накопитель

В соответствии с рисунками 3.6 и 3.7 формируются линейно возрастающие амплитуда и частота напряжения инвертора вплоть до номинальных значений. Таким образом, нагрузка через некоторый промежуток времени восстанавливает номинальные параметры технологического процесса.

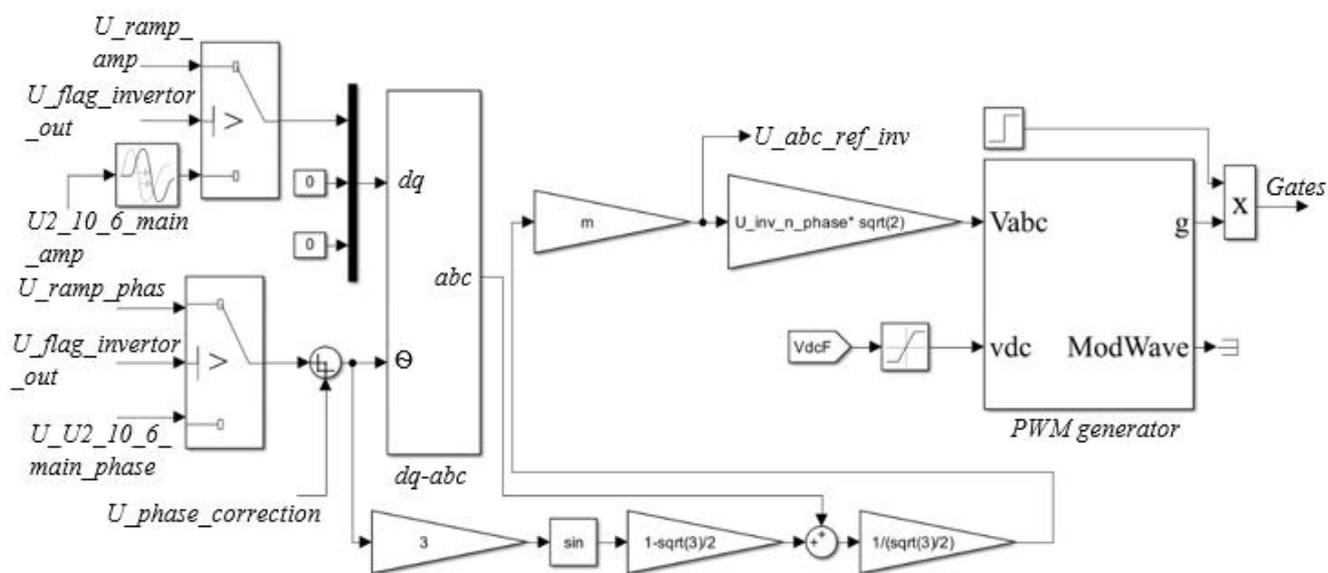


Рисунок 3.8 – Структурная схема формирования задающего сигнала на напряжение (U_{abc}) для ШИМ генератора инвертора накопителя

На рисунке 3.8 представлена структурная схема формирования сигнала задания на напряжение U_{abc} для ШИМ генератора до момента включения накопителя в основную сеть. Амплитуда и фаза напряжения инвертора формируется эквивалентно амплитуде и фазе ЭДС выбегающей нагрузки. Глубина модуляции составляет 0,95 при максимально возможной глубине 1,15. При

разработке данной структуры приняты следующие допущения:

1. Ключи трехфазной мостовой схемы инвертора представлены идеализированными *IGBT*-транзисторами с идеализированными обратными диодами;
2. Использован алгоритм модифицированной синусоидальной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой.

Структуры имитационных моделей силовой части инвертора накопителя энергии и его выходного синусного фильтра представлены на рисунках 3.9 – 3.10.

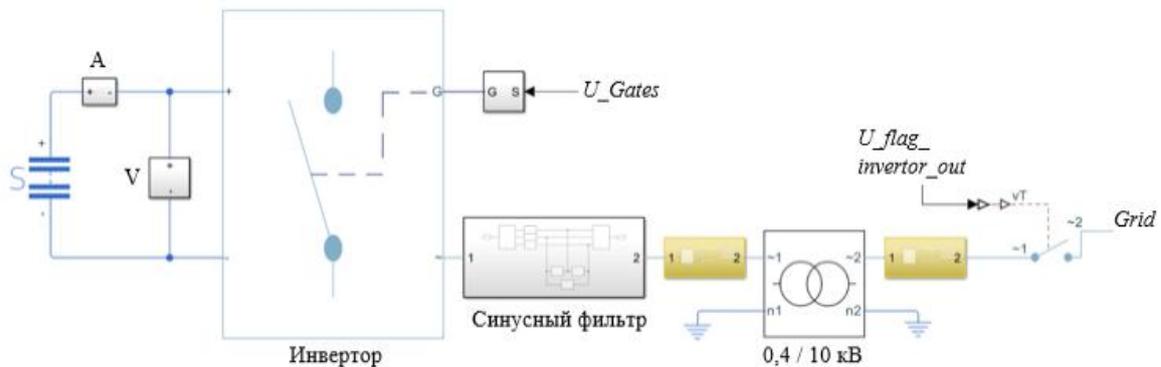


Рисунок 3.9 – Силовая часть инвертора

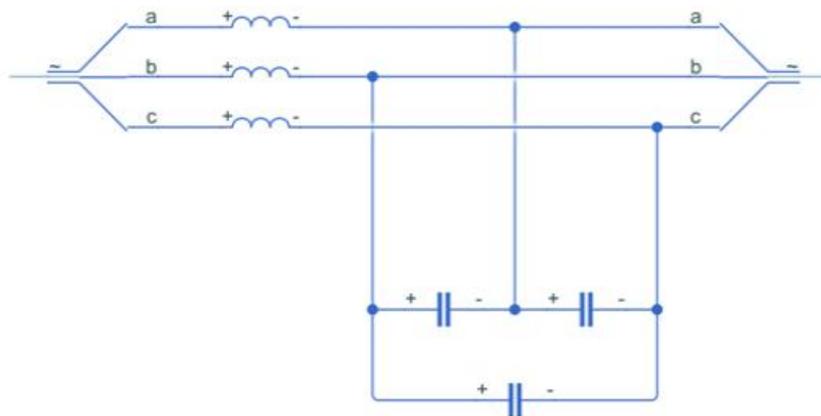


Рисунок 3.10 – Синусный фильтр

Расчет параметров выходного синусного фильтра инвертора накопителя энергии представлен ниже [69].

Определим требуемое индуктивное сопротивление фильтра

$$X_f^* = \frac{\pi \cdot U_{dc} \cdot f_{rat}}{6 \cdot \sqrt{2} \cdot f_{pwm} \cdot I_m^* \cdot U_{rat}}, \quad (3.8)$$

$U_{dc} = 633,986$ В – напряжение в звене постоянного тока,

$f_{rat} = 50$ Гц – номинальная частота тока нагрузки,

$f_{pwm} = 4000$ Гц – частота ШИМ,

$I_m^* = 0,2$ – требуемый максимальный уровень пульсации выходного тока инвертора,

$U_{rat} = 220$ В – номинальное действующее значение фазного напряжения на выходе синусного фильтра.

$$X_f^* = \frac{3,14 \cdot 633,986 \cdot 50}{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 4000 \cdot 0,2 \cdot 220} = 0,067 \text{ о. е.} \quad (3.9)$$

Определим частоту резонанса напряжений через частоту широтно-импульсной модуляции

$$\omega_u = \frac{\omega_{pwm}}{4}. \quad (3.10)$$

Рассчитаем ω_{pwm}

$$\omega_{pwm} = 2 \cdot \pi \cdot f_{pwm} = 2 \cdot 3,14 \cdot 4000 = 2,513 \cdot 10^4 \text{ рад/с.} \quad (3.11)$$

Тогда ω_u

$$\omega_u = \frac{2,513 \cdot 10^4}{4} = 6,283 \cdot 10^3 \text{ рад/с.} \quad (3.12)$$

Определим емкостную проводимость фильтра в относительных единицах при соединении конденсаторов в звезду

$$Y_f^* = \left(\frac{\omega_0}{\omega_u}\right)^2 \cdot \frac{X_f^* + X_l^*}{X_f^* \cdot X_l^*}, \quad (3.13)$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_{rat} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,159 \text{ рад/с.} \quad (3.14)$$

Для общепромышленного асинхронного двигателя при работе типового АИН индуктивное сопротивление нагрузки примем $X_l^* = 0,2$ о. е.

$$Y_f^* = \left(\frac{314,159}{6,283 \cdot 10^3}\right)^2 \cdot \frac{0,067 + 0,2}{0,067 \cdot 0,2} = 0,05 \text{ о. е.} \quad (3.15)$$

Для полного представления покажем отношение частоты резонанса напряжений к частоте резонанса токов. Для этого

$$\omega_i = \frac{\omega_u}{\sqrt{1 + \frac{X_l^*}{X_f^*}}} = \frac{6,283 \cdot 10^3}{\sqrt{1 + \frac{0,2}{0,067}}} = 3,142 \cdot 10^3 \text{ рад/с.} \quad (3.16)$$

Тогда

$$\frac{\omega_u}{\omega_i} = \frac{6,283 \cdot 10^3}{3,142 \cdot 10^3} = 2 \text{ о. е.} \quad (3.17)$$

Определим емкостную проводимость при соединении конденсаторов синусного фильтра в треугольник

$$Y_{\Delta f}^* = \frac{Y_f^*}{3} = \frac{0,05}{3} = 0,017 \text{ о. е.} \quad (3.18)$$

Для определения емкости фильтра вычислим Z_b через U_b и I_b

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b} = \frac{220}{1753,3} = 0,125 \text{ Ом.} \quad (3.19)$$

Тогда емкость фильтра

$$C_f = \frac{Y_f^*}{\omega_0 \cdot Z_b} = \frac{0,05}{314,159 \cdot 0,125} = 1,268 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.} \quad (3.20)$$

Индуктивность фильтра

$$L_f = \frac{X_f^* \cdot Z_b}{\omega_0} = \frac{0,067 \cdot 0,125}{314,159} = 26,634 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (3.21)$$

На рисунках 3.11 – 3.13 представлены переходные процессы по частоте вращения, моменту, напряжению и току статора двигателя, напряжению на выходе синусного фильтра в относительных единицах. Дополнительно представлены графики сигналов задания частоты и амплитуды выходного напряжения инвертора. Следует отметить, что в силу высокой инерционности приводного АД, частота выбегающей ЭДС отклоняется незначительно от номинального значения (50 Гц). Поэтому требуемая добавка по частоте питания при переводе нагрузки на накопитель энергии, в приведенном масштабе на верхнем рисунке 3.13, слабо различима.

В промежуток с 2 по 2,1 секунды осуществляется синхронизация фазы напряжения инвертора с фазой ЭДС выбегающей нагрузки. С момента времени 2,1 секунды и до конца этапа моделирования осуществляется разгон двигателя.

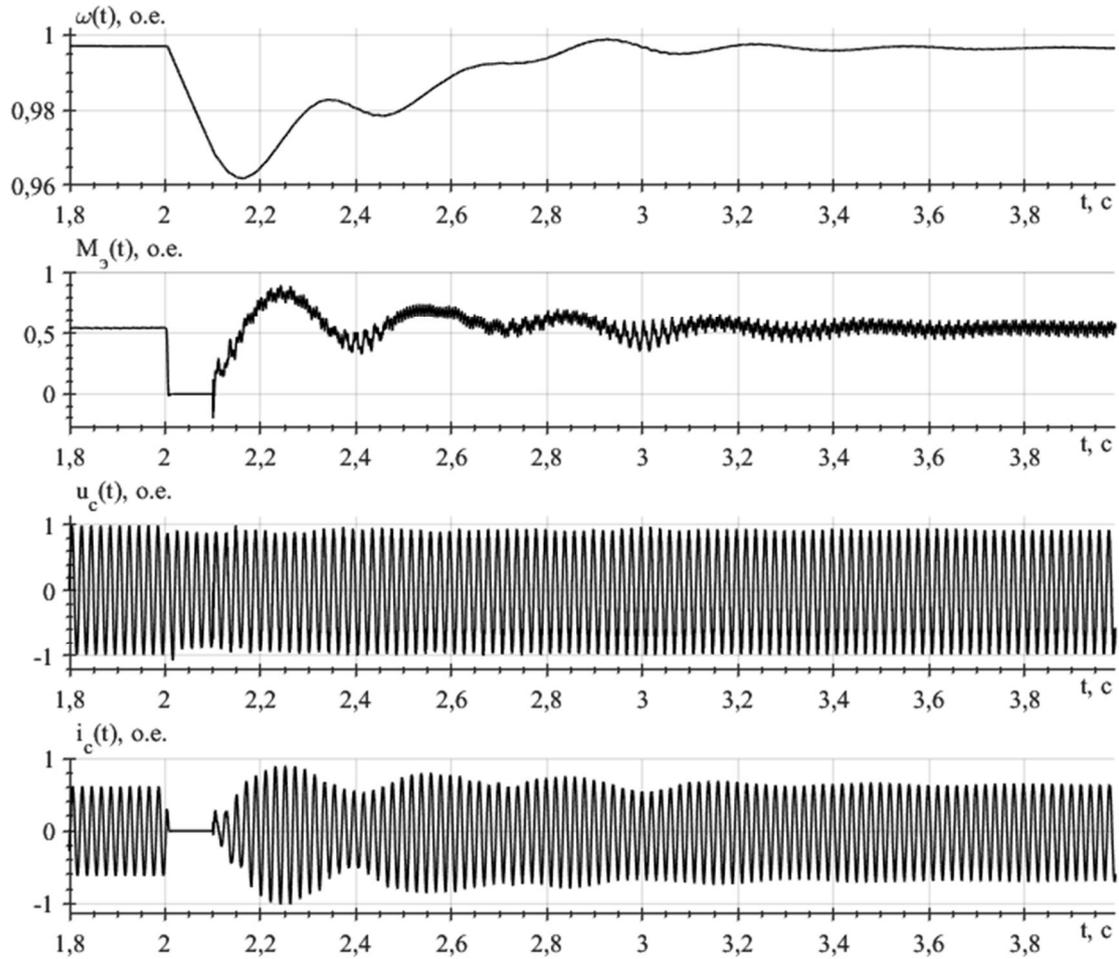


Рисунок 3.11 – Частота вращения, момент, напряжение и ток статора асинхронного двигателя

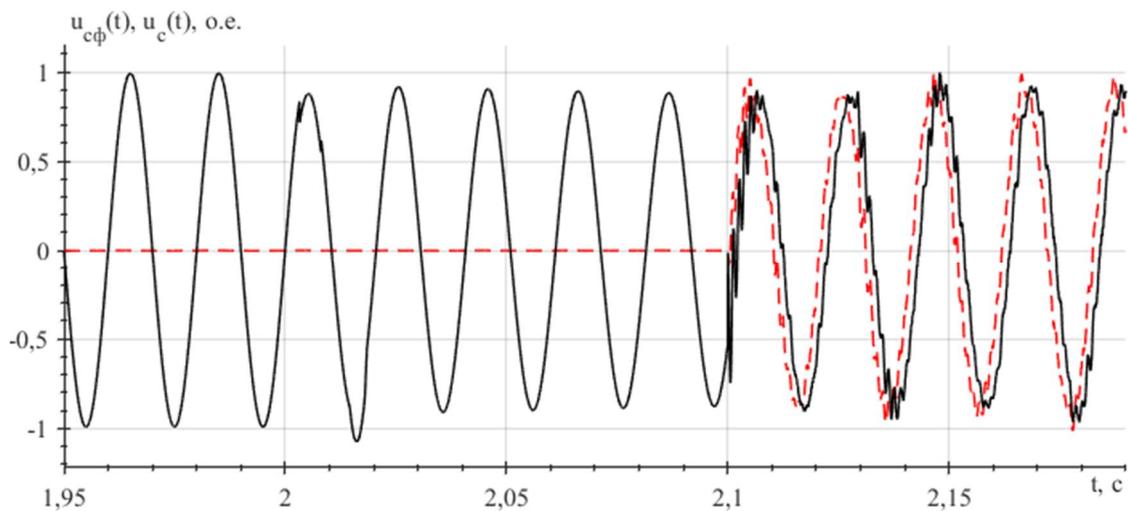


Рисунок 3.12 – Напряжение на выходе синусного фильтра (сплошная линия) и напряжение на обмотке статора АД (пунктирная линия) в момент коммутации

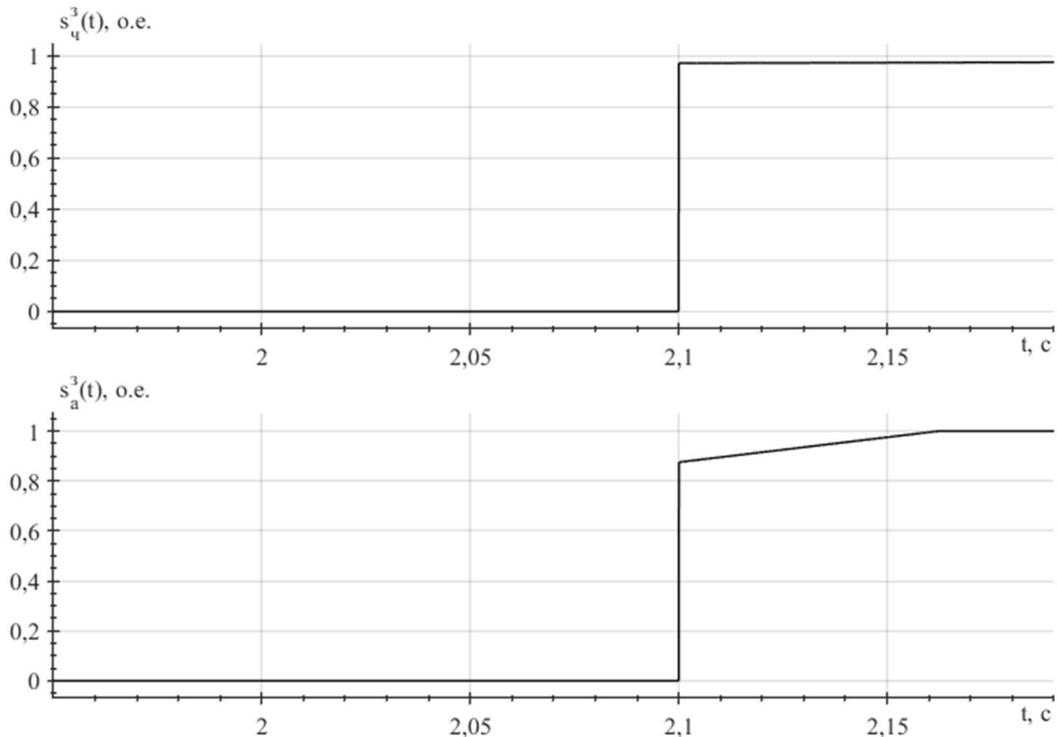


Рисунок 3.13 – Сигнал задания частоты и амплитуды напряжения инвертора

Выводы по результатам моделирования:

1. Общее время моделирования составляет 4 секунды. В промежуток времени с 0 по 2 секунду произведена подготовка системы электроснабжения, а именно основные координаты состояния системы приведены в установившиеся номинальные значения. В момент времени $t = 2$ секунды симитирована аварийная ситуация, при этом в последующие 0,1 секунды двигатель осуществляет выбег, частота вращения уменьшается, а $M = 0$. Напряжение на первичной обмотке трансформатора соответствует по форме ЭДС двигателя.

2. На рисунке 3.11 в промежуток с 2 по 2,1 секунды осуществлена синхронизация фазы напряжения инвертора с фазой ЭДС выбегающей нагрузки.

3. В следствие точной синхронизации ударный момент и бросок тока не превышают 1,35 от текущего значения момента и тока статора двигателя.

4. С момента времени 2,1 секунды и до конца этапа моделирования осуществляется разгон двигателя до номинальной частоты вращения средствами инвертора и накопителя энергии в соответствии с классическим законом

частотного регулирования ($U/f = const$).

5. В установившемся значении момента и тока статора электродвигателя при питании его от накопителя энергии через инвертор, значения пульсаций не превышают 20 % в соответствии с расчетом синусного фильтра.

Таким образом, осуществлен режим безударного переключения нагрузки с аварийной сети на накопитель энергии.

3.2.2 Переключение нагрузки с накопителя энергии на резервную сеть

В Приложении В (рисунок В.10) приведена структура логики системы управления быстродействующим автоматическим вводом резерва с накопителем энергии.

На рисунке 3.14 представлена структура задатчика уставки разницы фаз выходного напряжения инвертора накопителя энергии и резервной сети. Сигнал $U_ramp_dif_phase$ является сигналом задания для ПИ-регулятора разницы фаз. При этом сигнал $U_initial_dif_phase$ является начальным значением, от которого при помощи интегратора с отрицательным наклоном осуществляется вычитание одинаковых во времени значений. Таким образом, формируется линейное убывание сигнала задания разницы фаз от определенной начальной точки.

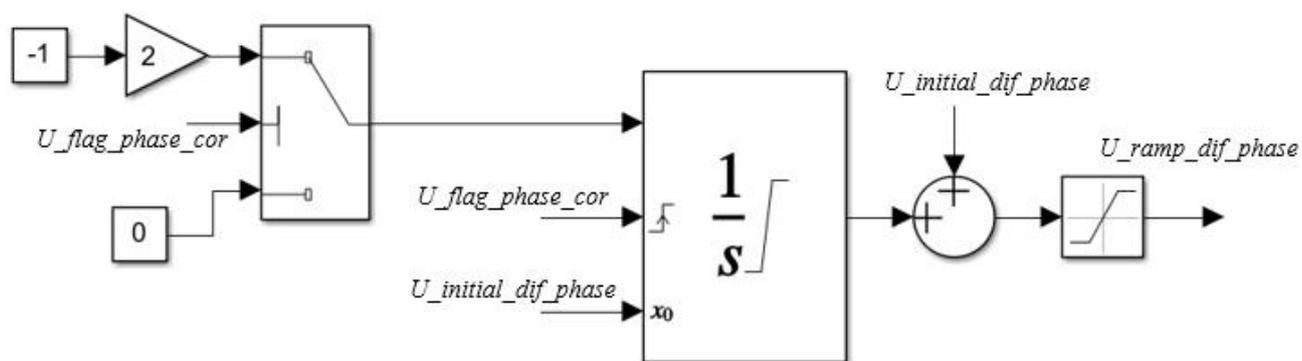


Рисунок 3.14 – Структура задатчика уставки разницы фаз накопителя и резервной сети

При определении коэффициентов ПИ-регулятора возможно применение двух основных подходов – практического и аналитического. В виду специфики

решаемой задачи и сложности аналитического уточнения всей полновесной системы электротехнического комплекса применять второй подход нецелесообразно. Для каждой системы подходы к синтезу регулятора в зависимости от мощности, топологии, наличия синусного фильтра, наличия частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП), длины линии ЛЭП и т.д. будут разные. По этой причине настройка ПИ-регулятора осуществляется при неполной информации об исходных данных системы электроснабжения промышленного предприятия, соответственно определение его коэффициентов возможно осуществить опытным способом. Используя методику последовательного приближения, настройкой сначала пропорциональной составляющей, а затем интегральной, результатом имитационного моделирования достигается требуемый характер переходных процессов по фазовой коррекции.

На рисунке 3.15 представлена структура регулятора разницы фаз напряжений инвертора и резервной питающей сети. Сигналом задания для этой структуры является переменная $U_ramp_dif_phase$, формируемая в соответствии с предыдущим рисунком, при этом сигнал отрицательной обратной связи приведен к значениям от $-\pi$ до π . На выходе ПИ-регулятора установлен блок выбора режима коррекции (включено / выключено), который вводит в систему коррекцию разницы фаз по сигналу логического флага $U_flag_phase_cor$.

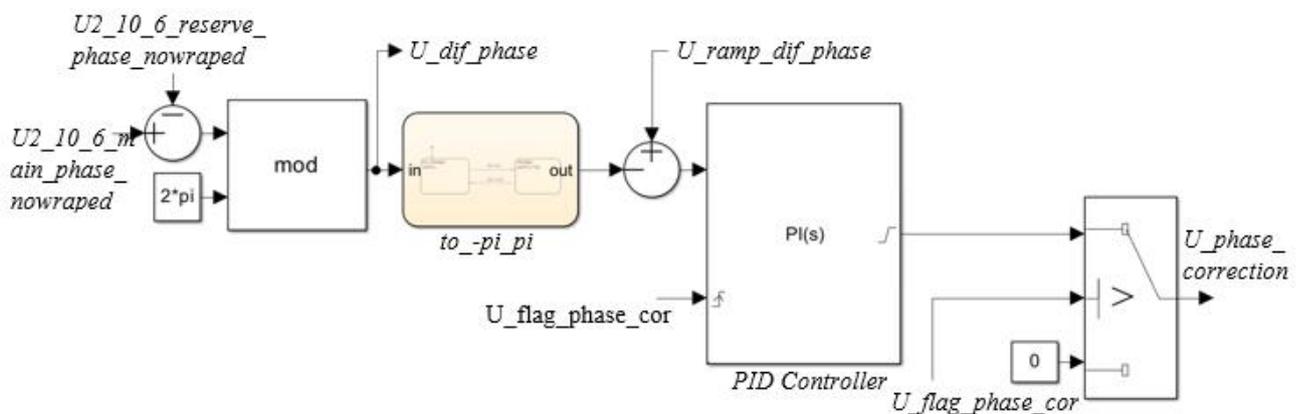


Рисунок 3.15 – Структура регулятора разницы фаз напряжений инвертора и резервной питающей сети

На рисунках 3.16 – 3.18 представлены графики переходных процессов рассматриваемого режима работы УКПН.

На рисунке 3.16 представлены переходные процессы по частоте вращения, моменту, напряжению и току статора двигателя в режимах: выбега двигателя; переключения питания двигателя с аварийной сети на накопитель энергии; разгон двигателя до номинальных значений координат состояния при питании его от накопителя энергии; коррекции разницы фаз выходного напряжения инвертора и резервной сети и конечное переключение питания двигателя с накопителя на резервную сеть. В следствие точной синхронизации ударный момент и бросок тока не превышают 1,5 от текущего значения момента и тока статора двигателя.

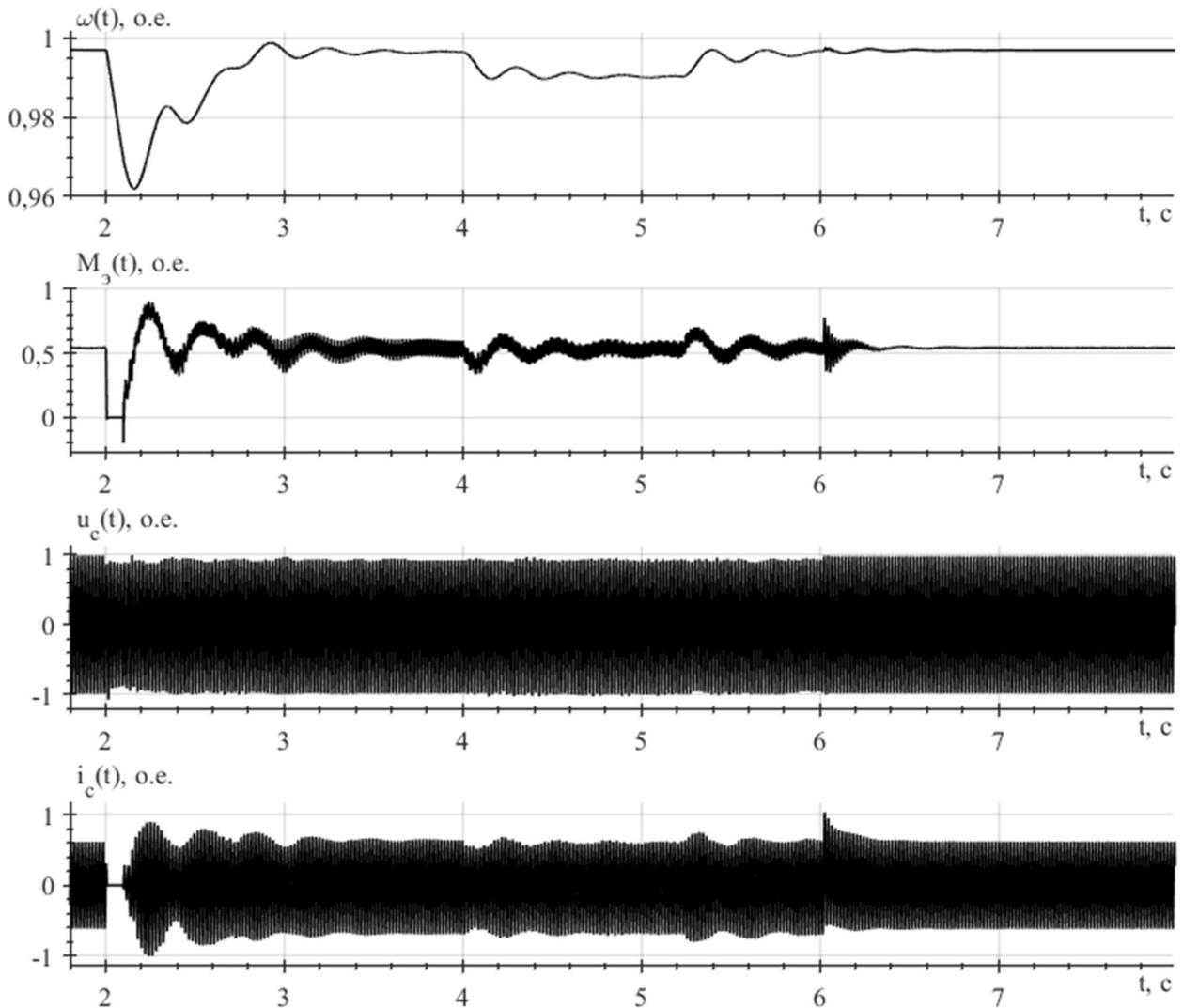


Рисунок 3.16 – Частота вращения, момент, напряжение и ток статора асинхронного двигателя

На рисунке 3.17 укрупненно представлены переходные процессы по напряжению статора двигателя основной сети и напряжению на вторичной обмотке трансформатора 10/6 кВ резервной сети. Управляющий сигнал системы регулирования поступает в момент времени 6 секунд, при этом фазы напряжения на выходе инвертора и резервной сети согласованы друг с другом. Переключение происходит с учетом задержки на срабатывание секционного выключателя, и разница мгновенных значений напряжений в любой фиксированный момент включения определяется только пульсациями напряжения на выходе инвертора.

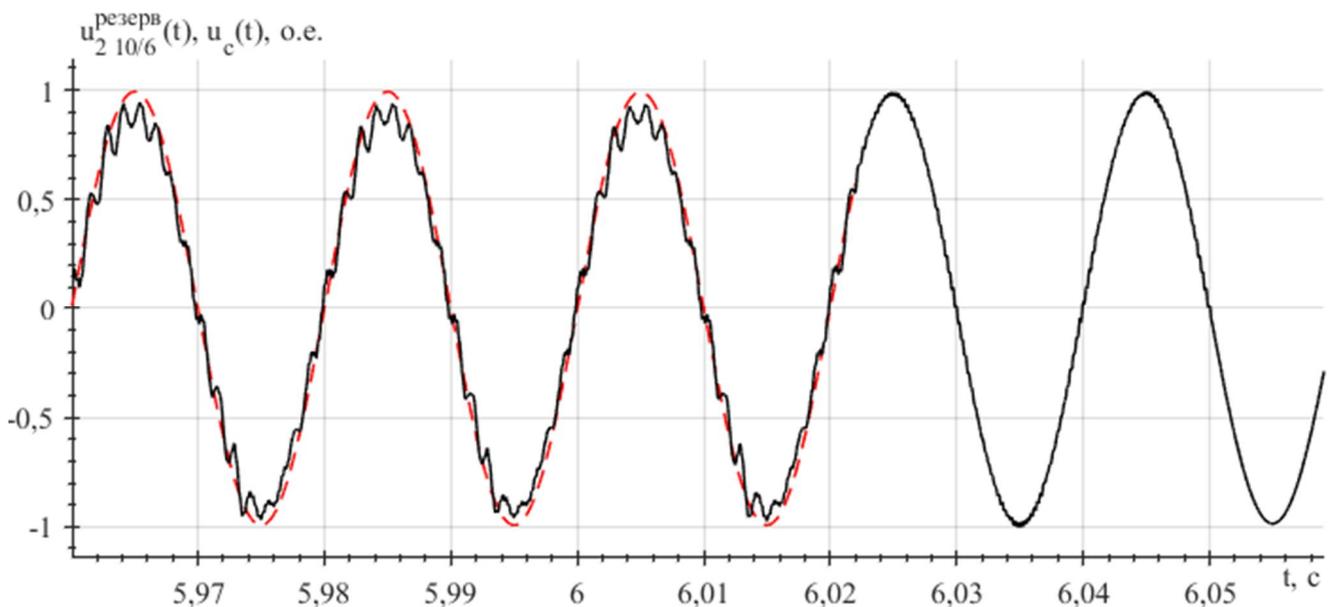


Рисунок 3.17 – Напряжение обмотки статора двигателя основной сети и напряжение на вторичной обмотке трансформатора 10/6 кВ резервной сети

На рисунке 3.18 представлен переходный процесс разницы фаз между напряжением инвертора, питающим нагрузку и вторичной обмоткой трансформатора 10/6 кВ резервной сети, а также переходный процесс сигнала на выходе ПИ-регулятора. В момент времени 4 секунды, при поступлении сигнала логического флага $U_flag_phase_cor$ (рисунок 3.15) осуществляется сброс интегратора ПИ-регулятора с последующей коррекцией разницы фаз до нулевого значения.

Переходный процесс по фазовому рассогласованию получен для коэффициентов $k_D = 1$ о.е. и $k_I = 8$ о.е. Из анализа семейства статических и динамических характеристик, полученных при синтезе регулятора, для различных k_D и k_I были сделаны следующие выводы:

- Уменьшение значения коэффициента пропорциональной составляющей регулятора приводит к появлению пульсаций процесса фазового рассогласования, в то время как увеличение данного коэффициента не приводит к видимым изменениям. Таким образом $k_D = 1$ считается оптимальным.
- Уменьшение значения коэффициента интегральной составляющей регулятора приводит к увеличению длительности процесса фазовой коррекции и возможному выходу за временные пределы работы накопителя в режиме ИБП. Увеличение значения коэффициента интегральной составляющей, характеризующееся быстрыми темпами фазовой коррекции, приводит к резкому изменению технологических параметров.

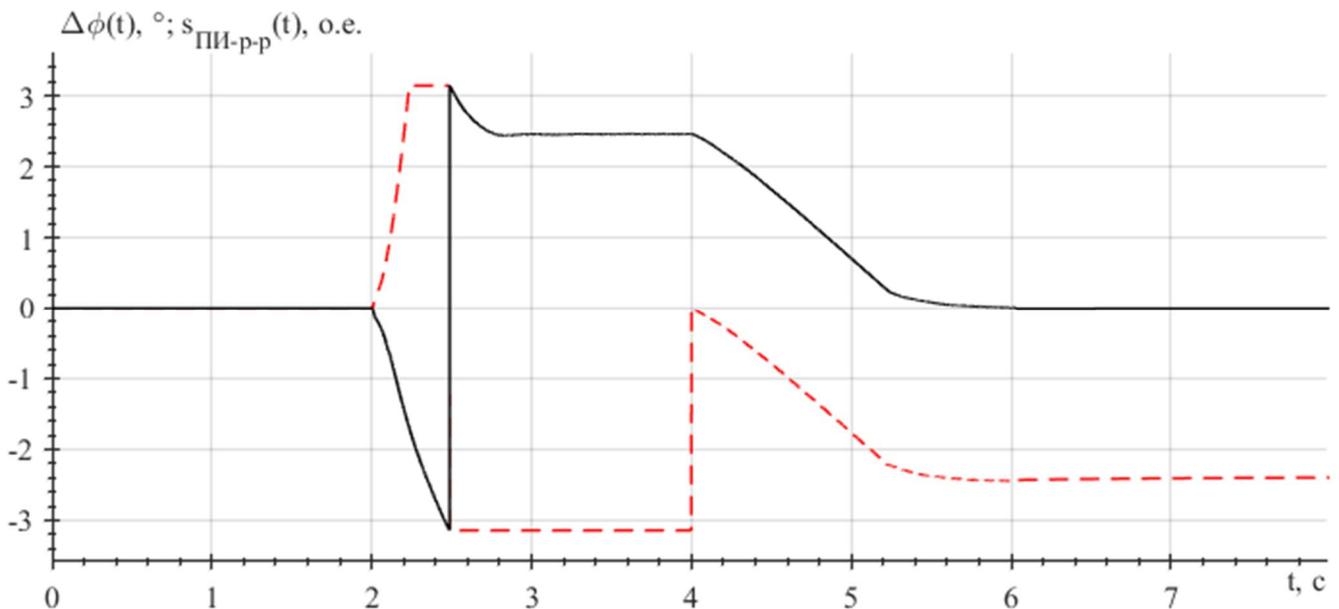


Рисунок 3.18 – Разница фаз между напряжением инвертора, питающим нагрузку и вторичной обмоткой трансформатора 10/6 кВ резервной сети (сплошная линия), выход ПИ-регулятора (пунктирная линия)

Таким образом, процедура настройки регулятора определяется возможным временем работы в режиме ИБП и требуемыми темпами изменения технологических параметров.

3.2.3 Переключение нагрузки при восстановлении работоспособности основной сети

При восстановлении работоспособности основной сети переключение нагрузки осуществляется в обратной последовательности по описанным выше принципам и с применением аналогичных алгоритмов синхронизации. Применяется следующая логика работы системы управления: обнаружение восстановления аварийной сети; переключение нагрузки на накопитель энергии основной сети; переключение нагрузки с накопителя энергии на основную сеть. Работа электротехнического комплекса продолжается в штатном (до аварийном) режиме.

3.3 Оценка технологических параметров насоса при провалах напряжения

Рассмотренные выше переходные процессы характеризуют, прежде всего работу электродвигателя при возникновении аварийных ситуаций, связанных с возмущениями в питающей сети. Очевидным является и то, что двигатель является частью механизма, участвующего в технологическом процессе. И, зачастую, на первый план выходит не качество электромеханических и электрических переходных процессов, а безостановочность и безаварийность технологического процесса во время работы системы БАВР.

Глубокий и длительный провал напряжения влечет останов критически важного оборудования, например, высоковольтного сетевого насоса, что в свою очередь приводит к снижению производительности и, возможно, остановке котла ТЭЦ, а в электрической части к росту кратности пусковых токов, в следствие этого дополнительному снижению напряжения и риску возникновения кавитационных процессов в насосном агрегате. Такая ситуация способна повлечь существенный ущерб предприятию.

Номинальные параметры исследуемого в диссертационной работе насосного агрегата приведены в таблице 2.5.

На рисунках 3.19 – 3.21 приведены переходные процессы, демонстрирующие результаты моделирования электромеханической системы с центробежным насосом. Основная задача системы управления БАВР сводится к обеспечению гарантированного невыхода параметров технологического процесса (напора и расхода) за допустимые значения к моменту завершения процедуры переключения нагрузки.

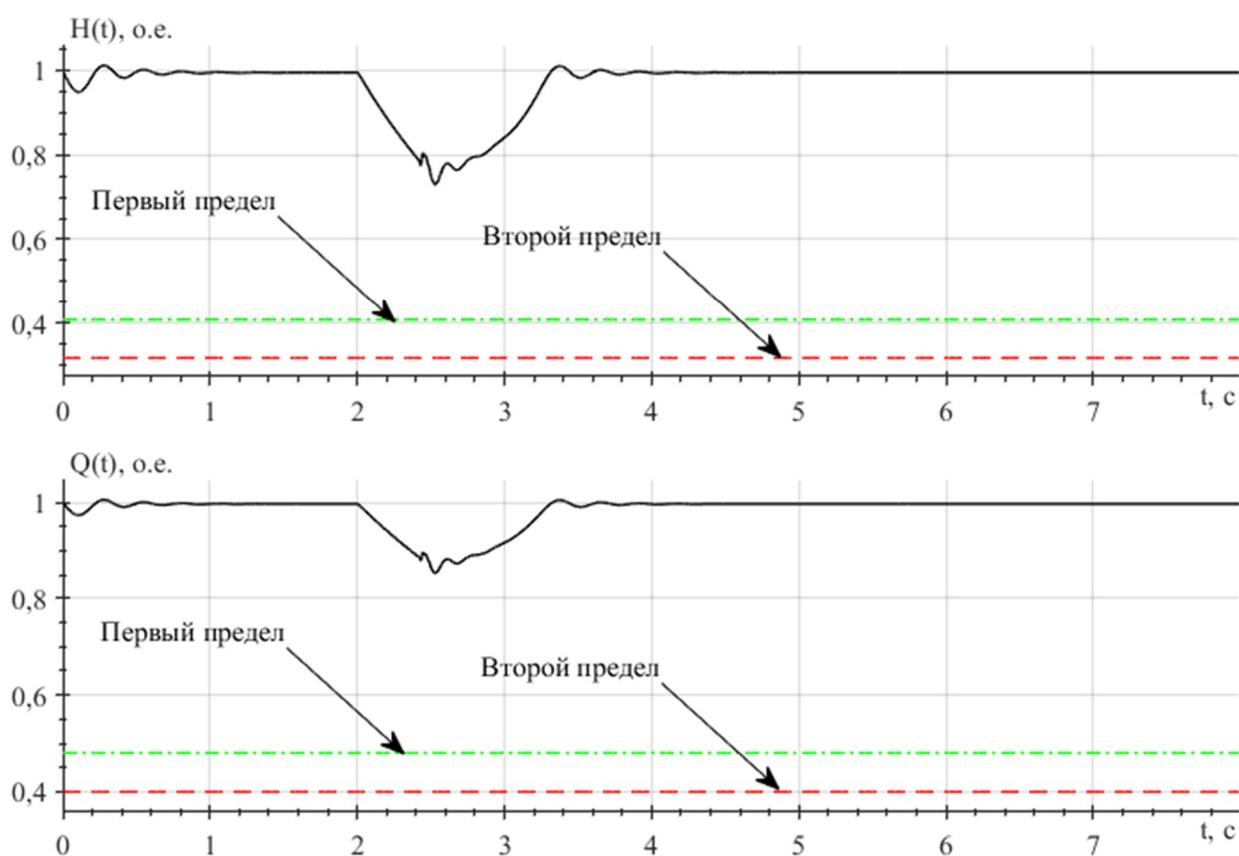


Рисунок 3.19 – Технологические параметры насоса при использовании АВР

По графикам переходных процессов, приведенных на рисунке 3.19 можно наблюдать существенное отклонение параметров технологического процесса (напора и расхода) от номинальных значений. Следует отметить, что данные отклонения являются критическими, так как при уменьшении уставки на определение аварийной ситуации, увеличении времени срабатывания

выключателей или времени принятия решения системой управления, наблюдается монотонное падение параметров технологического процесса и их невозвращение в заданный установившийся режим. Использование системы АВР в данном случае не представляется возможным, так как существует риск останова технологического процесса в целом.

«Первый предел» и «Второй предел» – уставки срабатывания защит, где сначала происходит предупредительная сигнализация оператору насосной станции, а далее автоматический останов технологического процесса, выполняемого насосом.

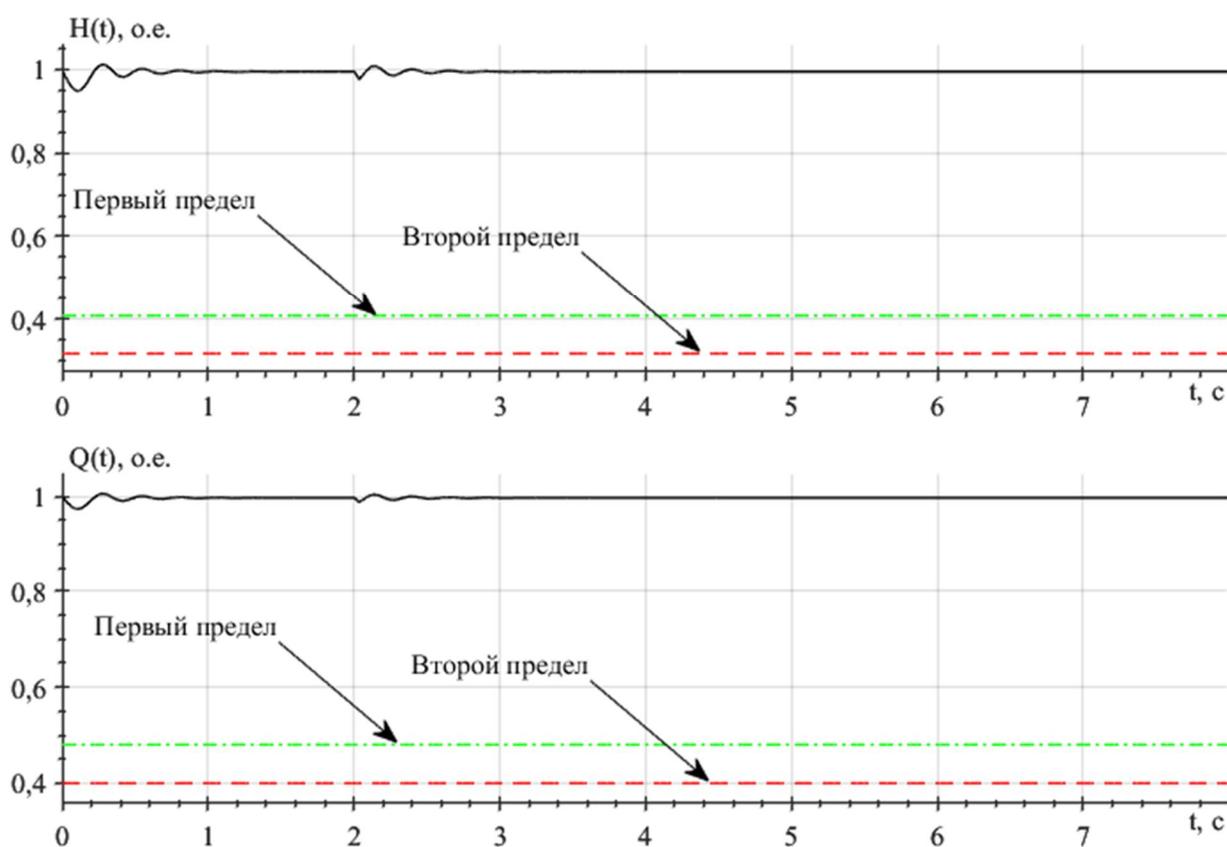


Рисунок 3.20 – Технологические параметры насоса при использовании БАВР с опытом выбега двигателя

По графикам переходных процессов, приведенных на рисунке 3.20 можно наблюдать незначительное отклонение параметров технологического процесса от заданных значений. Следует отметить, что данные графики получены по

значениям, используемым для опыта №2, входными данными для которого являются: 10% просадка по напряжению, определяющаяся как уставка для условия обнаружения аварийной ситуации системой управления; время возникновения аварии – на 2-ой секунде; диапазон допустимого рассогласования фаз ± 15 градусов от нулевого значения.

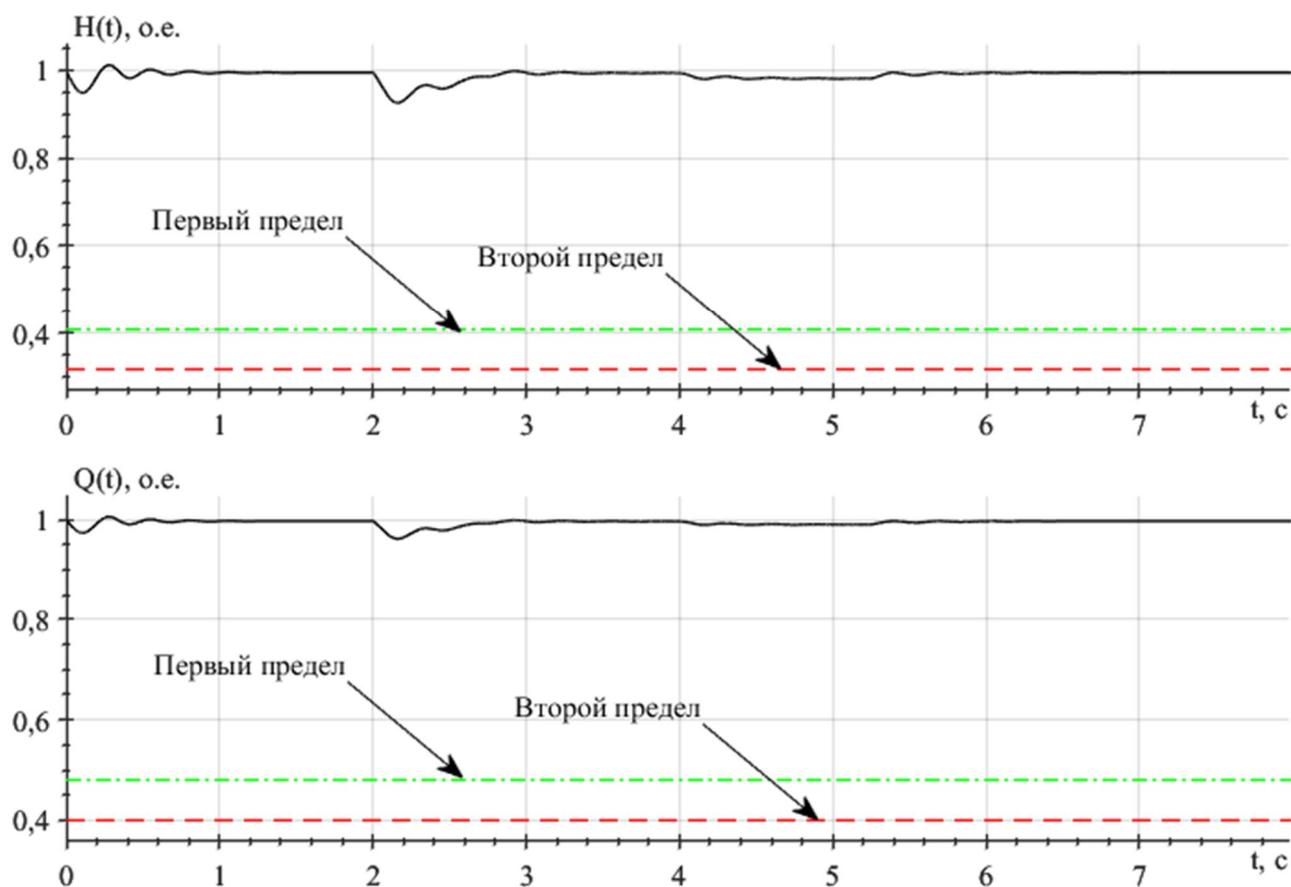


Рисунок 3.21 – Технологические параметры насоса для БАВР при переключении на накопитель энергии и резервную сеть

По графикам переходных процессов, приведенных на рисунке 3.21 можно наблюдать незначительное отклонение параметров технологического процесса. В отличие от АВР, при использовании БАВР переключение нагрузки осуществляется быстрее, параметры технологического процесса отклоняются от номинальных значений в незначительной степени.

3.4 Особенности работы системы управления устройством компенсации провалов напряжения в составе частотно-регулируемого электропривода

В главе 2 и главе 3 диссертационной работы рассматривался нерегулируемый высоковольтный асинхронный электропривод. При такой организации электромеханической системы АД напрямую включается в питающую сеть и напрямую отключается от нее. Подобный тип электрического привода в современных российских реалиях имеет право на существование и довольно широко распространён в различных отраслях промышленности. Применение нерегулируемого высоковольтного электропривода переменного тока связано, прежде всего, с высокой стоимостью и слабой доступностью на сегодняшнем российском рынке высоковольтных полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ). Однако, следует отметить что массовое внедрение высоковольтных ПЧ для высоковольтных электроприводов переменного тока лишь дело времени [70]. В связи с этим, далее в диссертационной работе будет проведено исследование взаимного влияния разработанной системы управления УКПН на собственную систему управления высоковольтным ПЧ.

Во время неглубокого провала напряжения или непродолжительной аварии в питающей сети, нерегулируемый электропривод с большой долей вероятности справится с данными возмущениями. Производительность ответственного технологического механизма восстановится. Но при питании высоковольтного АД от ПЧ, собственные внутренние защиты полупроводникового преобразователя гарантировано остановят выполнение технологического процесса. ПЧ быстро отреагирует на не симметрию и аварийное изменение питающей сети и остановит нагрузку принудительно. Загрублять уставки внутренних защит ПЧ в широких пределах не представляется возможным и является технически не рациональным подходом, так как возможен выход из строя ПЧ и, следовательно, серьезный финансовый урон промышленному предприятию. В исключительных случаях производители высоковольтных ПЧ дают возможность в узком диапазоне изменять уставки защит ПЧ по глубине и длительности провала напряжения. Но этого не

всегда бывает достаточно для того, чтобы согласовать взаимную работу системы управления ПЧ и БАВР.

Особенностью работы преобразователя частоты является высокая чувствительность к провалам напряжения питания. Их появление способствует срабатыванию собственной защиты минимального напряжения ПЧ и отключению нагрузки от выхода силового инвертора напряжения.

Даже в случае незначительного провала напряжения (на 15 – 20 % от номинального значения) преобразователь частоты обычно отключается по сработавшей внутренней защите.

Длительность короткого замыкания и следующего за ним провала напряжения зависит от времени срабатывания релейной защиты, определяющегося типом защиты, разветвленности контролируемой сети и прочих факторов [71].

Для исследования разработанных алгоритмов управления в составе электротехнического комплекса с ЧРЭП была смоделирована схема (рисунок 3.22), источником напряжения в которой выступает обобщенный конденсатор, являющийся приближением реального звена постоянного тока (ЗПТ) высоковольтного ПЧ.

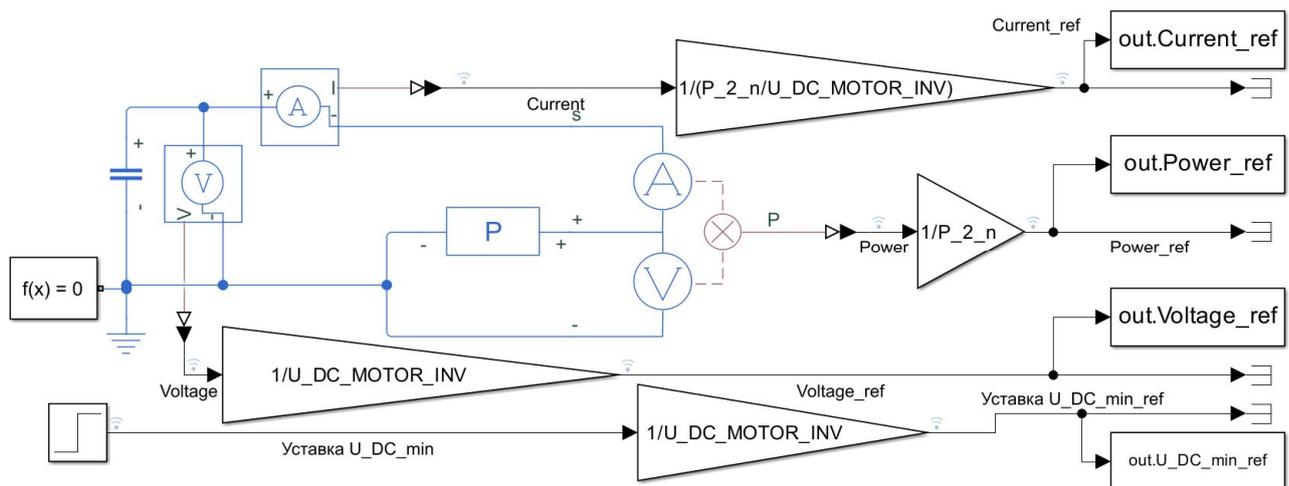


Рисунок 3.22 – Имитационная модель для исследования режима разряда ЗПТ высоковольтного ПЧ

Начальные условия для имитационного моделирования:

- Напряжение ЗПТ при глубине модуляции 0,85 составляет 9 983 В, уставка на срабатывание защиты по просадке напряжения в ЗПТ лежит в пределах 80 % от номинального значения;
- Емкость конденсаторов ЗПТ для насосной нагрузки выбрана в диапазоне 150...200 мкФ на 1 кВт установленной мощности.

Конденсатор обладает минимально возможным последовательным паразитным сопротивлением. К данному конденсатору в качестве нагрузки подключен блок, имитирующий следующий алгоритм работы:

1. При значениях напряжения на нагрузке в диапазоне от номинального до минимального имитационная модель представляет нагрузку постоянной мощности;
2. При достижении минимально допустимого значения напряжения (80 % от номинального) имитационная модель ведет себя как активное сопротивление.

На рисунке 3.23 представлены графики переходных процессов по напряжению на конденсаторе, его току, потребляемой мощности и уставке минимального напряжения.

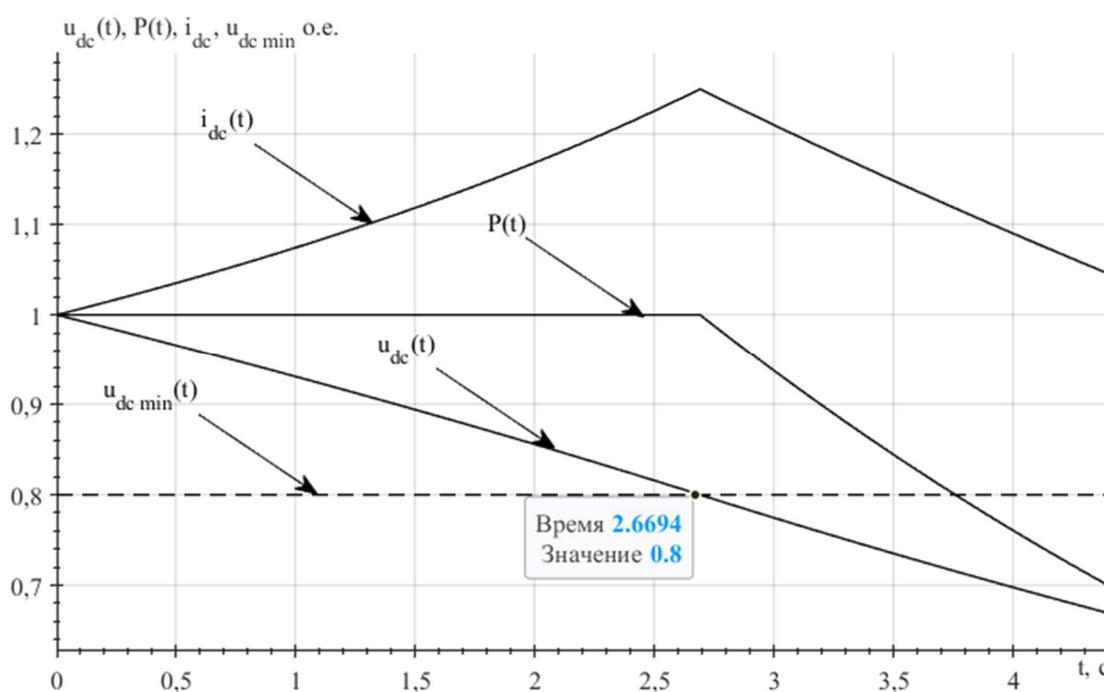


Рисунок 3.23 – Переходные процессы, характеризующие процесс разряда емкости ЗПТ высоковольтного ПЧ

Время достижения минимального напряжения ЗПТ при нагрузке мощностью 1 МВт составляет 2,67 секунды. Данное время больше времени срабатывания БАВР, что обеспечивает бесперебойность работы электротехнического комплекса.

Выводы по главе 3

Настоящая глава посвящена разработке и исследованию алгоритмов управления УКПН, содержащего накопитель электрической энергии. В результате проведенного анализа типов накопителей было принято решение о компоновке конечного обобщенного устройства накопления энергии из суперконденсаторных модулей *MO-162V50F-0* общим количеством 24 шт.

Для осуществления режимов переключения нагрузки на накопитель энергии, а в дальнейшем и на резервную сеть, составлены необходимые для этого алгоритмы и структуры согласования амплитуды, фазы и частоты напряжения. Для переключения нагрузки с накопителя энергии на резервную сеть осуществлена синхронизация фаз напряжений инвертора и резервной питающей сети посредством введения ПИ-регулятора разницы фаз с непосредственной коррекцией сигнала задания фазы в подсистеме формирования сигналов задания фазных напряжений на ШИМ инвертора.

Работа синтезированных структур в целом определяет практическое отсутствие фазового (< 1 градуса) и амплитудного ($< 5\%$) рассогласований напряжений инвертора и резервной сети к моменту физического замыкания коммутирующих устройств БАВР. Таким образом, на всех этапах коммутации, в соответствии с графиками переходных процессов, отсутствует достижение ими предельных допустимых значений. Выбор момента формирования управляющего сигнала на замыкание высоковольтных выключателей не требует учета их временных коммутационных характеристик и определяются лишь временем затухания колебательных процессов при частотном регулировании АД. Такой подход исключает необходимость предсказания момента срабатывания коммутирующих аппаратов в системе БАВР.

Регулятор разницы фаз синтезирован, исходя из первичного приближения передаточной функции инвертора к безынерционному звену. Динамика формирования фазы напряжения определена исключительно передаточными функциями синусного фильтра и нагрузки. Стоит отметить, что в представленном опыте компенсация влияния динамики формирования фазы напряжения на выходе синусного фильтра не осуществлялась. Параметры ПИ-регулятора приняты из учета допустимой динамики изменения механических координат состояния электропривода (частоты вращения и момента двигателя) при реализации законов частотного регулирования. Для этих целей сформирована структура задатчика изменения фазы напряжения на выходе синусного фильтра инвертора. Регулирование фазы напряжения осуществляется в пределах $\pm\pi$ с учетом ближайшего достижения нулевого рассогласования фаз.

Разработанные алгоритмы управления УКПН обеспечивают не превышение момента и тока АД величины 150 % от номинальных значений на всех этапах перевода нагрузки с аварийной сети на резервный источник энергии. Время замещения аварийной сети составляет не более 100 мс.

Помимо анализа графиков переходных процессов для электрических и электромеханических координат состояния двигателя осуществлена оценка технологических параметров (напора и расхода) центробежного сетевого насоса СЭ 1250-140-11. Сравнение данных технологических параметров осуществлялось для всех разработанных систем: АВР, БАВР с опытом выбега и БАВР с накопителем энергии. В результате оценки поведения координат состояния технологического процесса можно сделать вывод о преимуществе использования системы БАВР.

Также в данной главе приведены рассуждения, касающиеся работы представленных алгоритмов управления в составе электротехнического комплекса с ЧРЭП. В результате сравнения времени срабатывания защиты ПЧ и времени срабатывания БАВР сделан вывод о возможности безостановочной и безаварийной работы при внедрении ПЧ в разработанную систему компенсации провалов напряжения.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С УСТРОЙСТВОМ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Существуют различные подходы к практической реализации системы управления УКПН. Управляющие алгоритмы могут быть выполнены с помощью микроконтроллера или программируемого логического реле [72]. В данной главе диссертационной работы представлен вариант, при котором алгоритмы управления УКПН выполняются совместно микроконтроллером *Atmel AVR (ATmega2560)* и программируемым логическим реле (ПЛР) *ONI PLR*.

Следует отметить, что вопросом программно-аппаратной реализации систем управления УКПН различной топологии и назначения занимаются многие исследователи. Особый интерес вызывают результаты, использующие довольно простые технические средства при построении алгоритмов управления УКПН [73], что вполне актуально для потребителей в составе электротехнических комплексов малой мощности.

Конечная цель научно-технического эксперимента, проводимого в настоящем разделе диссертационного исследования сводится к сборке стенда, имитирующего работу электротехнического комплекса в условиях возмущений в питающей сети, программированию логического реле, загрузке программы непосредственно из *matlab* в микроконтроллер, наладке и снятию осциллограмм переходных процессов по соответствующим переменным и координатам. В дальнейших разделах диссертации будут представлены разработанные автором чертежи монтажных и принципиальных электрических схем, а также иная вспомогательная конструкторская документация.

4.1 Разработка конструкторской документации на учебно-исследовательский стенд

В Приложении Г (рисунок Г.1) представлена монтажная схема реализуемого учебно-исследовательского стенда. Монтаж всего электротехнического и

вспомогательного оборудования выполнен на плоскости 1200x800x32 мм. Данный чертеж определяет расположение оборудования относительно осевых линий (горизонтальная, вертикальная). Погрешность установки составляет не более 2 мм для линейных измерений и не более 1 градуса для установки кабельных каналов.

Вспомогательным чертежом для монтажной схемы, определяющим тип используемого оборудования, является спецификация, приведенная в Приложении Г (рисунок Г.2). На данном чертеже не только приводятся пояснения к использованию оборудования или элемента управления и индикации, но и даются пояснения о функциональном назначении электрических аппаратов в составе учебно-исследовательского стенда. Например, автоматический выключатель *QF1* имитирует трансформатор 110/10 кВ основной сети, а работа индикатора *HL1* диагностирует включенное состояние выключателя основной сети *KM1* и т.д.

Расположение оборудования внутри главного щита (ГЩ) определяет его комплектация. Чертеж «Исследуемая система. Комплектация ГЩ» приведен в Приложении Г (рисунок Г.3).

Принципиальная электрическая схема учебно-исследовательского стенда приведена в Приложении Г (рисунок Г.4). Данный чертеж является руководством к монтажу внутренних электрических соединений оборудования стенда, программированию логического реле (указываются входы ПЛР, подключенные к элементам управления). Также на данной схеме указаны места включения измерительных датчиков и контрольных точек, связывающих оборудование с системой управления.

Для создания нагрузки электродвигателя основной сети разработан и изготовлен вариант нагрузочного элемента, представляющего собой стальной диск, закрепляющийся на валу двигателя. При проектировании заложена возможность регулирования момента инерции путем установки через шпильки съемных стальных дисков. Чертеж нагрузочного элемента и дисков приведен в Приложении Г (рисунок Г.5).

4.2 Алгоритмы работы логического реле и микроконтроллера

В таблице 4.1 приведено оборудование стенда, характеристики которого могут представлять интерес для оценки составленного алгоритма и полученных переходных процессов.

Таблица 4.1 – Перечень оборудования учебно-исследовательского стенда

№	Наименование	Функционал
1	Контактор модульный КМ20-40 АС 20А 400В	Выключатели основной (КМ1), резервной (КМ2) сети, секционный выключатель (КМ3)
2	Логическое реле <i>PLR-S</i> . <i>CPU1206(R)</i> 220В АС с экраном	Управление индикацией, выключателями основной и резервной сети, секционным выключателем
3	Отладочная плата <i>MEGA2560 R3 AVR 16U2</i>	Выполнение алгоритма управления УКПН, управление программируемым логическим реле
4	Однофазный датчик напряжения переменного тока (диапазон измерения 250 В)	Измерение напряжения в основной и резервной сети
5	Однофазный датчик переменного тока (диапазон измерения 5 А)	Измерение тока в основной и резервной сети
6	Фотоэлектрический модуль датчика скорости	Измерение скорости вращения вала двигателя основной сети
7	Электродвигатель АИР 56А4 380В, 0,12кВт, 1500об/мин, <i>IM</i> 1081	Нагрузка, потребитель электроэнергии в составе системы электроснабжения электротехнического комплекса

Система управления смонтирована на листе оргстекла размером 580x280x5 мм. Гравировка, резка монтажных и посадочных отверстий выполнена на лазерном

станке, стойки системы управления изготовлены на 3D-принтере.

В таблице 4.2 представлен перечень контрольных точек электрической принципиальной схемы, которые используются в качестве сигналов для системы управления. В скобках перед адресом указан номер цифрового маркера проводника.

Таблица 4.2 – Перечень контрольных точек для системы управления

<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>
(1) <i>KM1</i> (2/ <i>T1</i>) (2) <i>XS1</i> (<i>L1</i>) (3) <i>KM1</i> (4/ <i>T2</i>) (4) <i>XS1</i> (<i>L2</i>) (5) <i>KM1</i> (6/ <i>T3</i>) (6) <i>XS1</i> (<i>L3</i>)	(7) <i>KK2</i> (2) (8) <i>KM2</i> (1/ <i>L1</i>) (9) <i>KK2</i> (4) (10) <i>KM2</i> (3/ <i>L2</i>) (11) <i>KK2</i> (6) (12) <i>KM2</i> (5/ <i>L3</i>)	(13) <i>QF3</i> (2) (14) <i>N</i>
<i>G4</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>
(15) <i>PLR</i> (<i>I5</i>) (16) <i>PLR</i> (<i>I6</i>) (17) <i>PLR</i> (<i>I7</i>) (18) <i>PLR</i> (<i>I8</i>) (19) <i>PLR</i> (<i>I9</i>)	(20) <i>GB1</i> (+) (21) <i>GB1</i> (–)	(22) <i>KM1</i> (7/ <i>L4</i>) (23) <i>KM1</i> (8/ <i>T4</i>) (24) <i>KM2</i> (7/ <i>L4</i>) (25) <i>KM2</i> (8/ <i>T4</i>) (26) <i>KM3</i> (7/ <i>L4</i>) (27) <i>KM3</i> (8/ <i>T4</i>)
<i>G7</i>		
(28) <i>SB1</i> (<i>NC</i>) 1 (29) <i>SB1</i> (<i>NC</i>) 2 (30) <i>SB2</i> (<i>NC</i>) 1 (31) <i>SB2</i> (<i>NC</i>) 2 (32) <i>SB3</i> (<i>NC</i>) 1 (33) <i>SB3</i> (<i>NC</i>) 2 (34) <i>SB4</i> (<i>NC</i>) 1 (35) <i>SB4</i> (<i>NC</i>) 2		

В Приложении Г (рисунок Г.6) приведен совмещенный чертеж монтажной и принципиальной электрической схем системы управления. В ее состав входят 6 датчиков тока (3 для основной и 3 для резервной сети), 6 датчиков напряжения (аналогично датчикам тока), релейные модули, через которые осуществляется

трансляция сигналов на программируемое логическое реле, микроконтроллер, реализующий алгоритм УКПН, *DC-DC* преобразователь, а также тумблеры управления питанием и макетные платы, выполняющие вспомогательные функции.

В Приложении Г (рисунок Г.7) приведена функциональная блок-схема разработанного алгоритма управления работы ПЛР *ONI PLR*.

Созданная программа для реле проста в реализации, что подчеркивает ее практическую ценность, так как ПЛР в данном случае выполняет функцию управления выключателями и индикацией. Непосредственно реализация алгоритмов управления УКПН выполняется микроконтроллером. Ниже представлено описание программы *FBD* для ПЛР.

Нажатие кнопки *SB1* запускает электродвигатели *M1* и *M2* через 1 секунду. Работу основной и резервной линий сопровождает непрерывная работа ламп *HL1* и *HL2*. Остановка работы электромеханической системы возможна нажатием кнопок *SB2* и *SB4*, а именно: после нажатия *SB2* система прекращает работу, возможен повторный запуск электроустановки; после нажатия и самофиксации *SB4* система прекращает работу, нажатие *SB1* не приводит к повторному запуску электромеханической системы. После отпущения (приведения в первоначальное состояние) аварийной кнопки *SB4* возможен повторный запуск электроустановки. Индикационная лампа *HL3* включается и начинает мигать при срабатывании секционного выключателя *KM3*. Кнопка *SB3* используется в качестве теста системы, необходимого для проверки работоспособности выключателей и элементов индикации.

В Приложении Г (рисунок Г.8) приведена структурная схема *matlab* алгоритма управления УКПН с функцией БАПР, загружаемого в микроконтроллер. Нужно отметить, что составленные структуры алгоритмов работы УКПН, описанные в главах 2 и 3, непосредственно выгружаются из среды *matlab* в микроконтроллер после проведения предварительной подготовки. Тем самым доказывается практическая реализуемость и значимость созданных в диссертационной работе алгоритмов и структур.

4.3 Результаты исследования алгоритмов управления устройством компенсации провалов напряжения в составе учебно-исследовательского стенда

На рисунке 4.1 представлена фотография реального исполнения собранного учебно-исследовательского стенда. Сборка электроустановки соответствует приведенным ранее чертежам и общей конструкторской документации.

На рисунке 4.2 представлена фотография исполнения системы управления. Приходящие на соответствующие зажимы проводники промаркированы с помощью ленты *p-touch* устройства.



Рисунок 4.1 – Общий вид собранного учебно-исследовательского стенда

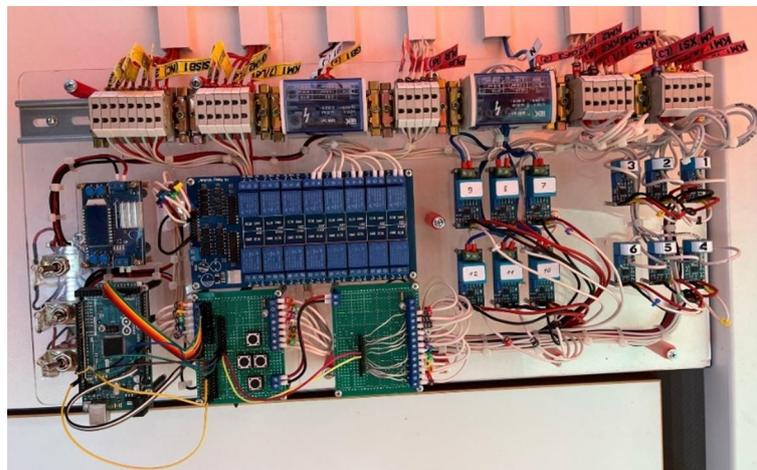


Рисунок 4.2 – Общий вид системы управления учебно-исследовательским стендом

На рисунке 4.3 представлен скомутированный ГЩ стенда. При выполнении коммутации учитывалось сечение используемых проводников согласно их назначению для силовой или управляющей части.

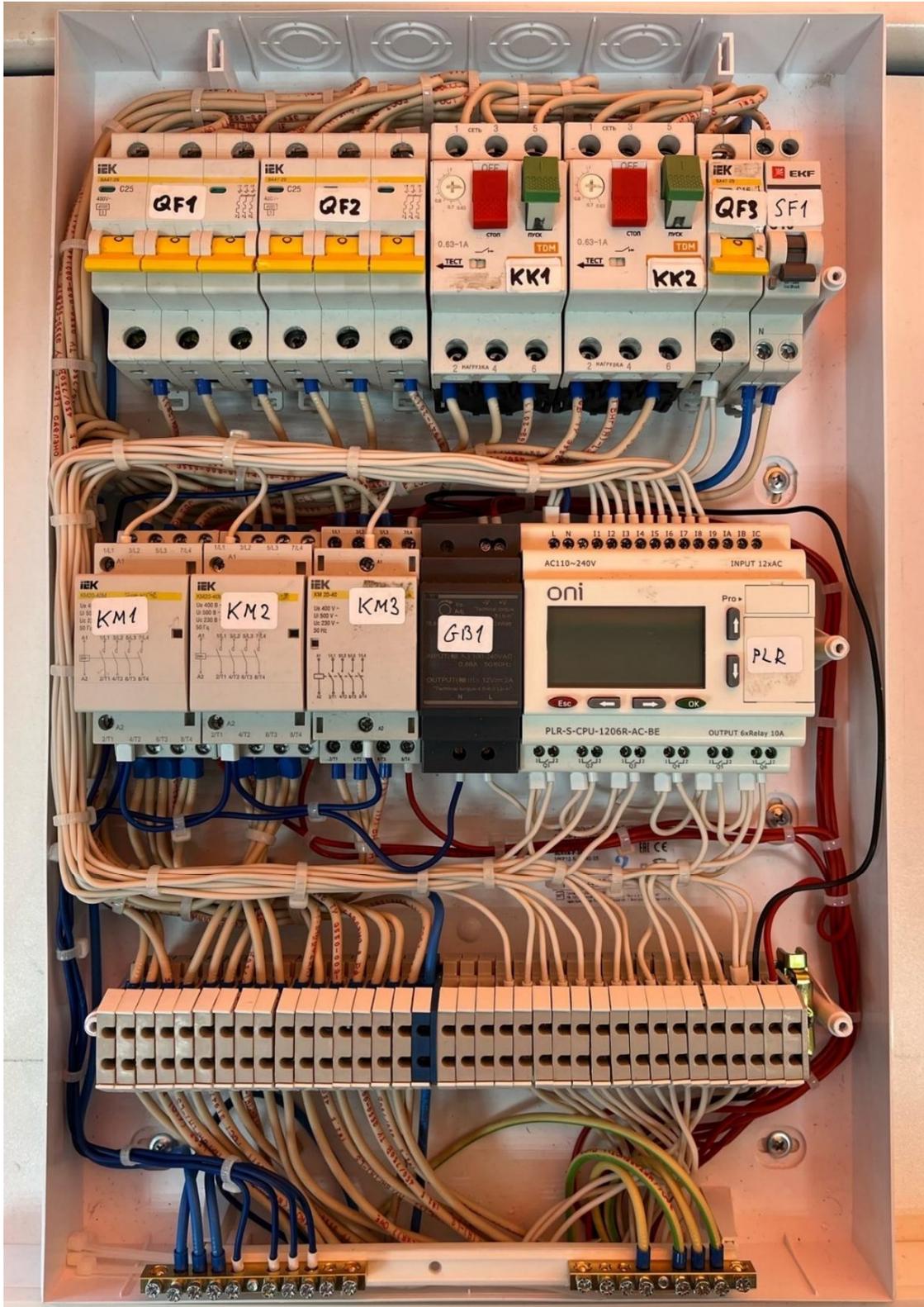


Рисунок 4.3 – Коммутация ГЩ учебно-исследовательского стенда

Как и в исследованиях, представленных в главах 2 и 3 настоящей диссертации, аварийная ситуация имитируется в основной сети. В конкретном случае под аварией подразумевается отключение питания на верхнем уровне системы электроснабжения (реализуется выключением пускателя КК1).

Ниже представлены осциллограммы работы электротехнического комплекса.

На рисунке 4.4 представлены осциллограммы определения фактической задержки отключения основной сети (розовый цвет – S_1 , сигнал СУ на отключение основной сети; синий цвет – S_2 , фактическое отключение основной сети). Цена деления по оси x составляет 20 мс, по оси y – 200 мВ.

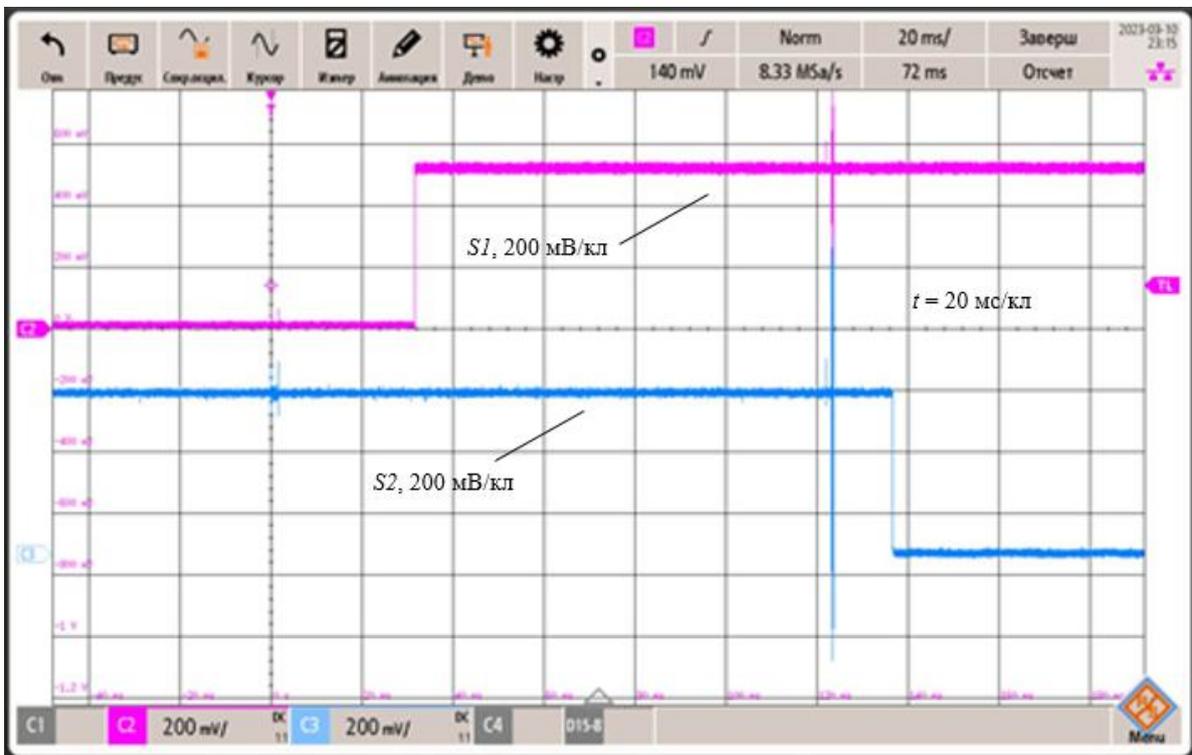


Рисунок 4.4 – Определение фактической задержки отключения основной сети при возникновении аварии в ней

На рисунке 4.5 представлены осциллограммы логических и электрических переходных процессов в основной сети (синий цвет – U_c , напряжение статора АД; зеленый цвет – I_c , ток статора АД; розовый цвет – S_1 , фактическое отключение основной сети; голубой цвет – S_2 , включение секционного выключателя). Цена

деления по оси x составляет 48 мс, по оси y : для U_c – 500 мВ, для I_c – 100 мВ, для S_1 и S_2 – 1В.

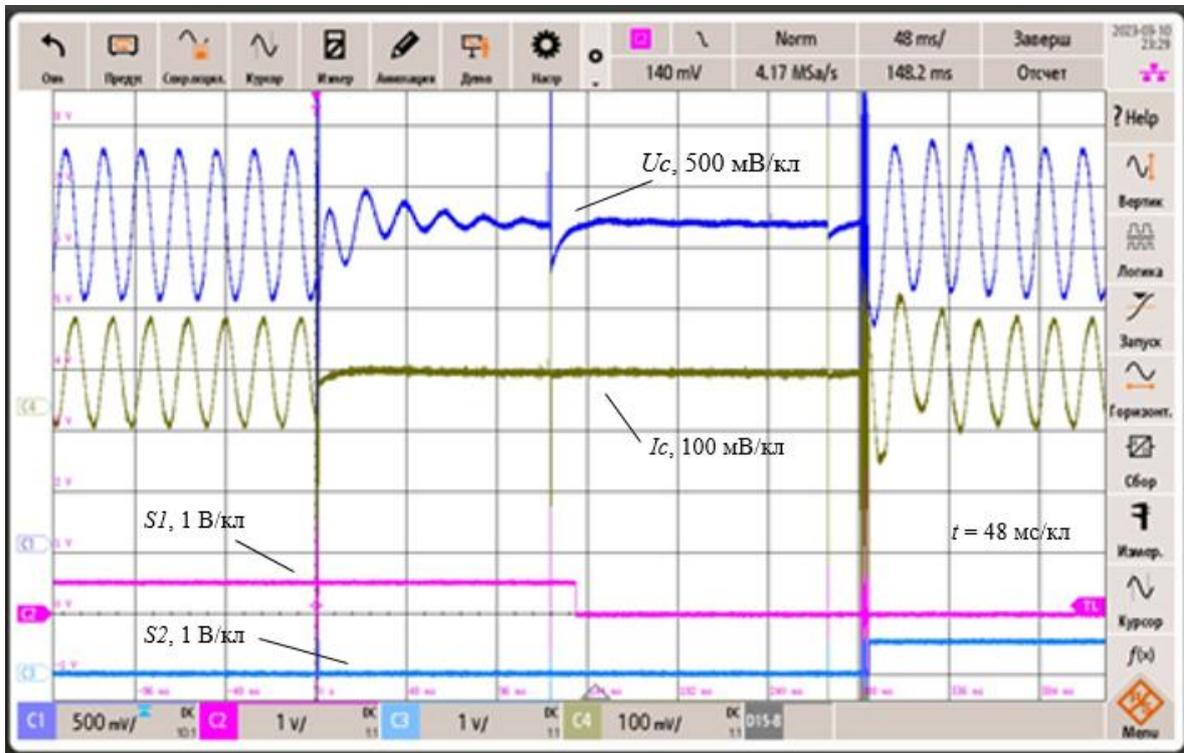


Рисунок 4.5 – Логические и электрические переходные процессы в основной сети

Общее время замещения аварийной сети составляет 288 мс. Практическая апробация алгоритмов управления УКПН подтвердила проведенные теоретические разработки и представляет собой значительную инженерную ценность при их внедрении в реальные электротехнические комплексы.

4.4 Практические рекомендации о выборе топологии устройства компенсации провалов напряжения

На основании проведенного исследования могут быть сформулированы следующие практические рекомендации о необходимости и выборе типа УКПН для различных структур систем электроснабжения и электротехнических комплексов промышленных предприятий:

1. Необходимо определить категорию электроснабжения потребителя.

Для третьей категории целесообразно выбрать АВР. Для потребителей первой категории целесообразно выбирать БАВР. Наличие накопителя энергии в качестве промежуточного резервного источника будет определяться спецификой местонахождения, условиями организации системы электроснабжения и режимом работы промышленного предприятия.

2. Для потребителей второй категории возможно применение в качестве УКПН как АВР, так и БАВР. Итоговый выбор должен определяться исходя из условий, представленных ниже.

3. При требованиях по быстрдействию на замещение аварийной сети для ответственного потребителя электрической энергии, до 100 мс рекомендуется выбирать структуру БАВР.

4. В совокупности с п.3 следует оценить время реакции на аварийную ситуацию и требуемую уставку по просадке напряжения для определения аварии. Совместно с этим, необходимо произвести оценку стабильности параметров системы электроснабжения электротехнического комплекса, диапазоны их изменений.

5. Необходимо определить наличие в составе электротехнического комплекса ЧРЭП. При наличии таковых, оценить время срабатывания защит, определяемых уставкой разряда ЗПТ. В случае превышения времени замещения аварийной сети УКПН времени срабатывания защит ПЧ по питающему напряжению – выбрать АВР, в противном случае БАВР.

6. Определить степень влияния перебоев в системе электроснабжения на электрические и электромеханические характеристики потребителя электрической энергии. В особо критических случаях сделать выбор в пользу БАВР, в противном случае – АВР.

7. Оценить характер работы потребителя (в том числе характер нагрузки на валу двигателя) и риск его выхода из строя в случае некорректного переключения. Например, для мощных электродвигателей, в работе которых возможны броски момента и высокие кратности пускового тока, целесообразно выбрать БАВР. Для электрических аппаратов, режимы работы которых

характеризуются своей неизменностью – АВР.

8. Оценить характер технологического процесса, в том числе влияние друг на друга основного и вспомогательного оборудования. В случае явных взаимосвязей потребителя и прочих электрических, электромеханических, механических устройств и технологических процессов выбрать БАВР, в противном случае – АВР. Если нагрузка на валу электродвигателя приводит к тому, что замещение аварийной сети УКПН возможно только более 5 периодов питающего напряжения, БАВР выбирать не целесообразно, так как его алгоритмом скорректировать безударное переключение невозможно.

9. Оценить характер и вероятность возможных аварийных ситуаций в системе электроснабжения и в структуре электротехнического комплекса промышленного предприятия (различные типы коротких замыканий, различные по длительности провалы напряжения, отключения электропитания), сезонность и климатические условия эксплуатации. В случаях превалирования отключения сети общего назначения над другими типами аварий, выбрать АВР (с учетом условий, приведенных в пунктах рекомендаций, изложенных выше), при наличии иных типов аварий или невозможности оценить частоту их возникновения, выбрать БАВР. Учесть, что при коротких замыканиях возможна подпитка точки короткого замыкания выбегающей ЭДС двигателя.

10. При выборе БАВР, для уточнения необходимых настроек его системы управления, произвести оценку требуемых темпов полного восстановления технологических параметров. Следует отдавать отчет о том, что чересчур высокие темпы восстановления технологических параметров могут негативно отразиться на сроке службы оборудования, его износе.

Выводы по главе 4

Данный раздел диссертации был посвящен разработке лабораторного учебно-исследовательского стенда. На собранной электроустановке имитируется работа системы электроснабжения, работающей на нагрузку в виде асинхронных

двигателей.

В качестве логических органов системы управления использовано программируемое логическое реле *ONI PLR* и микроконтроллер *Atmel AVR (ATmega2560)*, составлен алгоритм работы исследуемой установки на основе данных устройств.

В главе приводятся разработанные чертежи и вся сопроводительная конструкторская документация в виде: спецификации, монтажной схемы, комплектации главного щита, электрической принципиальной схемы. Также приводятся фотографии выполненной установки в виде общего вида стенда и скоммутированного главного щита.

Предлагаемые алгоритмы работы УКПН, разработанные в соответствующих разделах теоретического исследования, демонстрируют свою пригодность и применимость на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований диссертационной работы:

1. Рассмотрены основные известные технические решения устройств компенсации провалов напряжения, систем электроснабжения электротехнических комплексов и промышленных предприятий. Выбрана схема электроснабжения и тип УКПН для настоящего диссертационного исследования.

Подробно рассмотрен вопрос построения системы автоматического ввода резерва. Рассматривается назначение и принципы функционирования устройства быстродействующего автоматического ввода резерва, приводятся преимущества его промышленной эксплуатации. Определяется роль использования накопителей энергии в вопросах построения систем компенсации провалов напряжения ответственных потребителей. Отмечаются возможности использования суперконденсаторов для борьбы с провалами напряжения.

В качестве объекта исследования выбрана система электроснабжения предприятия, использующая напряжение энергетической системы 110 кВ. В разработанную имитационную модель заложены параметры понижающих трансформаторных подстанций напряжением 110/10 кВ и 10/6 кВ. Внутренней сетью предприятия является распределительная электросеть напряжением 6 кВ, питающая нагрузку в виде высоковольтного асинхронного двигателя номинальной мощностью 1 МВт. Резервная сеть по своей топологии аналогична основной.

2. Осуществлен синтез и исследование системы управления устройствами автоматического ввода резерва и быстродействующего автоматического ввода резерва для потребителя мощностью более 500 кВт с вентиляторным характером нагрузки. Предложен алгоритм выбора структуры систем автоматического управления и их параметров.

В целях научно-технического анализа была разработана система управления АВР. Результаты исследования позволили сделать вывод о том, что данное устройство принципиально не способно обеспечить автоматическое регулирование, и как следствие, минимизацию бросков тока и момента

электродвигателя при переключении нагрузки на резервную сеть. Данный фактор является определяющим для электроприводов средней и большой мощности.

Для построения системы управления БАПР используется опыт выбега асинхронного двигателя. Представлены перспективы использования системы управления БАПР, построенной на основе опыта выбега асинхронного двигателя, при помощи средств нейросетевого обучения и нечеткой логики.

Разработаны подходы к проектированию системы управления УКПН с использованием релейных элементов и ключей при составлении логики и использование метода конечных автоматов (*stateflow*).

3. Осуществлен синтез и исследование системы управления устройством быстродействующего автоматического ввода резерва с накопителем электрической энергии. Произведен расчет системы накопления энергии, состоящей из последовательно-параллельного подключения суперконденсаторных модулей. Время работы устройства в режиме ИБП при полностью автономном электропитании нагрузки составляет 3,9 секунды.

Замещение аварийной сети осуществляется за время не более 100 мс, технологические параметры насосной установки отклоняются от согласованных значений не более, чем на 10 %.

Результаты проведенных исследований доказывают, что разработанные алгоритмы управления позволяют использовать УКПН в составе частотно-регулируемого электропривода объектов ЖКХ.

4. Разработан имитационный учебно-исследовательский стенд электротехнического комплекса. Результаты проведенных натуральных экспериментов подтверждают практическую применимость разработанных алгоритмов управления устройствами УКПН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хамитов, Р. Н. Провалы напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Р. Н. Хамитов, Е. С. Соловьева // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики: в 2-х томах, Тюмень, 18–20 декабря 2019 года / Ответственный редактор: А. Н. Халин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 354-357. – EDN HMFQND;
2. Провалы напряжения в сети 10 КВ / Я. Л. Арцишевский, С. Э. Гармашук, М. М. Кузьмин, С. Е. Калинин // Инновационные подходы в современной науке : сборник статей по материалам XXIV международной научно-практической конференции : Общество с ограниченной ответственностью "Интернаука", 2018. – С. 63-67. – EDN XTNWFV;
3. Маджидов, А. Ш. Влияние провалов напряжения на работу агрегатов собственных нужд ТЭЦ / А. Ш. Маджидов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов, Москва, 14–15 марта 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2019. – С. 981. – EDN CBZQPC;
4. Power quality. The overlooked productivity variable [Электронный ресурс]. – ([https:// literature.rockwellautomation.com / idc / groups / literature / documents / br / power-br011_-en- p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/power-br011_-en-p.pdf));
5. Пупин, В. М. Устройства защиты от провалов напряжения / В. М. Пупин ; В. М. Пупин. – Москва : НТФ "Энергопрогресс", 2011. – 99 с. – (Библиотечка электротехника : приложение к журналу "Энергетик"). – EDN QMLLTZ;
6. De Santis M., Noce C., Varilone P., et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks // Electric Power Systems Research. 2018. V. 154. pp. 391–400;

7. Зацепина, В.И. Моделирование провалов напряжения в системах электроснабжения металлургических производств [текст] / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2017. - Т. 23. - №2. - С. 247-251;
8. Зацепина, В. И. Оценка параметров надежности электроснабжения от отказов выключателя при провалах напряжения / В. И. Зацепина, И. Г. Шилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S8. – С. 352-358. – EDN KZXPJH;
9. Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. №2. С. 43-50;
10. Секретарев, Ю. А. Расчет ущерба от перерыва электроснабжения в распределительных сетях с единым потребителем электрической энергии / Ю. А. Секретарев, Д. А. Меняйкин // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 2. – С. 25-29. – EDN YXRFD;
11. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Влияние форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016 № 7-8. – С. 64–71;
12. Distributed generation and the voltage profile on distribution feeders during voltage dips / B. Renders, L. Vandeveld, L. Degroote [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2010. – Vol. 80. – No 12. – P. 1452-1458. – DOI 10.1016/j.epsr.2010.06.012. – EDN OCXZJB;
13. Balouji, E. Predictive Compensation of EAF Flicker, Voltage Dips Harmonics and Interharmonics Using Deep Learning / E. Balouji, T. Mckelvey, O. Salor // Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), Vancouver, BC, 10–14 октября 2021 года. – Vancouver, BC, 2021. – DOI 10.1109/IAS48185.2021.9677400. – EDN BNXJCN;
14. Liao H., Milanovic J., Rodrigues M., et al. Voltage Sag Estimation in

Sparsely Monitored Power Systems Based on Deep Learning and System Area Mapping // IEEE Transactions on Power Delivery, 1–1.2018;

15. Gomez J.C., Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of volt-age sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment // Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc. 2001. Vol. 2, № C. pp. 1196–1199;

16. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21 № 1-2. С. 131-140;

17. Ершов, А. М. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : Учебное пособие по курсовому проектированию / А. М. Ершов ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения». – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 99 с. – EDN CAQAXL;

18. Конюхова, Е. А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры) : Учебное пособие / Е. А. Конюхова. – Москва : "Русайнс", 2017. – 160 с. – ISBN 978-5-4365-1136-8. – EDN UDIEYI;

19. Воротников, И. Н. Надежность радиальной схемы распределительной сети без секционирования и резервирования / И. Н. Воротников, И. В. Данченко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 44. – С. 247-251. – EDN RSPICJ;

20. Особенности электроснабжения металлургического завода "ММК-Metalurji" / Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, А. В. Ануфриев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 235-238. – EDN RPOSMN;

21. Особенности аварийного электроснабжения металлургического завода "ММК-METALURJI" / В. Б. Славгородский, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 253-257. – EDN

RPFHZR;

22. Электроэнергетика. Виды схем электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] / Электроэнергетика. – Режим доступа: <https://forca.com.ua/statti/srs/vidy-shem-elektrosnabzheniya-promyshlennyh-predpriyatii.html> – Загл. с экрана;

23. Марашкин, В. А. Обеспечение бесперебойного электроснабжения с помощью устройств автоматического ввода резерва / В. А. Марашкин // Главный энергетик. – 2012. – № 2. – С. 28-30. – EDN PUSPAB;

24. Алексеев, М. В. Решения по автоматическому вводу резерва / М. В. Алексеев // Научные вести. – 2022. – № 2(43). – С. 179-205. – EDN QUMWRR;

25. Иманалиева, Б. М. Устройство автоматического ввода резерва / Б. М. Иманалиева, Д. А. Кузнецов // Актуальные проблемы науки и техники - 2015 : Материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых, Уфа, 16–18 ноября 2015 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. – С. 106-108. – EDN VBJCRJ;

26. Орлов, Д. А. Автоматический ввод резерва. Принцип работы АВР / Д. А. Орлов // Развитие инструментов управления научной деятельностью : сборник статей международной научно-практической конференции: в 4 частях, Уфа, 18 мая 2017 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2017. – С. 100-102. – EDN YOIXUZ;

27. Айтенова, А. Б. Построение системы автоматического ввода резерва / А. Б. Айтенова // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". – 2021. – № 7. – С. 124-127. – EDN GYUMCO;

28. Пиминов, Ю. С. Автоматический ввод резерва на Owen ПР110-24.12Д.8Р / Ю. С. Пиминов // Инновационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Сборник трудов научно-практической студенческой конференции кафедры электротехники, автоматики и метрологии электроэнергетического факультета, Ставрополь, 13–14 декабря 2017 года. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2017. – С. 16-18. – EDN YMКТYR;

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617688 Российская Федерация. Автоматический ввод резерва на три ввода : № 2016612942 : заявл. 01.04.2016 : опубл. 13.07.2016 / М. А. Александров ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Завод инновационных технологий». – EDN CWJHAQ;

30. BONPET. Автоматический ввод резерва (ABP): назначение, устройство, схемы [Электронный ресурс] / BONPET. – Режим доступа: <https://chint-electric.ru/automatic-transfer-switch> – Загл. с экрана;

31. Габдрахимов, А. А. Быстродействующий автоматический ввод резерва / А. А. Габдрахимов // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики: в 2-х томах, Тюмень, 18–20 декабря 2019 года / Ответственный редактор: А. Н. Халин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 235-237. – EDN IONJJO;

32. СЗЭМО. Быстродействующий автоматический ввод резерва (БABP) [Электронный ресурс] / СЗЭМО. – Режим доступа: <https://www.szemo.ru/inzhiniring/elektrosnabzhenie/prosadki-i-perenapryazheniya/bystrodeystvuyushchiy-avtomaticheskiiy-vvod-rezerva-bavr/> – Загл. с экрана;

33. Бахтеев, К. Р. Предотвращение провалов напряжения на промышленных предприятиях при помощи накопителей электроэнергии / К. Р. Бахтеев // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017 : Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 419-420. – EDN ZIXACV;

34. Куликов, Ю. А. Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Ю. А. Куликов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018 : Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября

2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 38-43. – EDN RYHBRF;

35. Гадиева, Э. А. Разработка систем резервирования с применением накопителей энергии для повышения надежности электроснабжения / Э. А. Гадиева, Н. В. Денисова // Актуальные вопросы в науке и практике : Сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции. В 5-ти частях, Самара, 11 декабря 2017 года. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2017. – С. 58-62. – EDN YLGAUL;

36. Шутенкова, О. С. Современные накопители электроэнергии / О. С. Шутенкова // Тинчуринские чтения : Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В трех томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 90-99. – EDN SNNDMO;

37. Латипов, С. Т. Накопители электроэнергии как средство предотвращения нарушений электроснабжения / С. Т. Латипов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 16 (150). — С. 187-189. — URL: <https://moluch.ru/archive/150/42462/> (дата обращения: 06.10.2020);

38. Косарева, И. А. Оптимизация режимов работы ТЭЦ при прохождении пиков и провалов электрической нагрузки : специальность 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Косарева Ирина Александровна. – Москва, 1984. – 181 с. – EDN NPGKJB;

39. Яковец, В. Ю. Теплоэлектроцентраль. Мини-ТЭЦ. принцип работы / В. Ю. Яковец, П. А. Белькович, Г. А. Михальцевич // Актуальные проблемы энергетики - 2021 : Материалы студенческой научно-технической конференции, Минск, 25–29 октября 2021 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2021. – С. 545-547. – EDN SICSBA;

40. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под П79 ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.;

41. Группа компаний «РУСМАШ». Сетевой насос СЭ 1250-140-11 [Электронный ресурс] / Группа компаний «РУСМАШ». – Режим доступа: <https://www.nporusgidro.com/catalog/promyshlennye-nasosy/nasosy-dlya-chistoy-vody/setevye-i-pitatelnye-nasosy/setevye-nasosy/se1250-140-11/> – Загл. с экрана;

42. Аракелян, А. К. Анализ провалов напряжения при пуске электродвигателей с вентиляторной нагрузкой / А. К. Аракелян, А. Г. Калинин // Электричество. – 2011. – № 6. – С. 46-50. – EDN NTYUCB;

43. Пастухов, В. В. Моделирование прямого пуска асинхронного двигателя / В. В. Пастухов, К. В. Корнеев // Инновационная энергетика : материалы II научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 10–12 ноября 2010 года / Министерство образования и науки РФ, Учреждение Российской академии наук Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН и др.. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2010. – С. 242-245. – EDN SSFUYT;

44. Chervonenko, A. P. The Development of a Virtual Learning Kit in the Discipline "mathematical Modeling of Systems and Components of the Electric Drive" / A. P. Chervonenko, D. A. Kotin // 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings : 10, Novocherkassk, 03–06 октября 2018 года. – Novocherkassk, 2018. – P. 8571519. – DOI 10.1109/ICEPDS.2018.8571519. – EDN WUASGB;

45. Лавлинский, В. В. Основы использования блока Stateflow для проектирования виртуальной реальности в среде MATLAB / В. В. Лавлинский, Е. Е. Обручников // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2009. – № 5. – С. 188-189. – EDN PUOIJ;

46. Червоненко А.П., Котин Д.А., Рожко А.В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, №5. С. 160-171. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171;

47. Нос О.В. Построение алгоритмов синхронизации трехфазных напряжений автономного инвертора и сети // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 4. – С.

66–73;

48. Федоров, М. М. Использование устройств БАВР для обеспечения гарантированного питания электроприемников промышленных предприятий / М. М. Федоров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Двадцать третья международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, 02–03 марта 2017 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 368. – EDN ZIKGUP;

49. Ищенко, Д. А. Быстродействующий автоматический ввод резерва для систем электроснабжения с высоковольтными асинхронными двигателями : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ищенко Дмитрий Алексеевич. – Краснодар, 2002. – 199 с. – EDN QDOJPH;

50. Червоненко, А. П. Безударный перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением быстродействующего автоматического ввода резерва / А. П. Червоненко, Д. А. Котин, Е. А. Домахин // Электротехника. – 2022. – № 5. – С. 18-23. – DOI 10.53891/00135860_2022_5_18. – EDN UZLXXU;

51. Гаязов, А. М. Быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР) в системах электроснабжения с синхронными и асинхронными двигателями / А. М. Гаязов // Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции, Тюмень, 16–20 мая 2016 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 308-311. – EDN VYCBGZ;

52. Предварительный выбор электрических аппаратов, установленных на стороне ВН и НН подстанции // Электроснабжение и электрооборудование горного производства : Часть 1: учебное пособие. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 163-200. – EDN ZSDYNB;

53. Папков, Б. В. Оценка вероятностей несимметричных режимов систем электроснабжения / Б. В. Папков, В. Л. Осокин, Д. Е. Дулепов // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 4(119). – С. 31-41. – DOI 10.24412/2227-9407-2021-4-31-41. – EDN SQNJRC;

54. MathWorks. Time Series Forecasting Using Deep Learning [Электронный ресурс] / MathWorks. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/time-series-forecasting-using-deep-learning.html> – Загл. с экрана;

55. Червоненко А.П. Разработка систем управления устройствами компенсации провалов напряжения в сетях промышленных предприятий / А.П. Червоненко, Д.А. Котин // Материалы XXIII Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2022) : Сборник докладов конференции, Тула, 28 сентября – 01 2022 года / Под редакцией О.В. Горячева. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – 58 с. – ISBN 978-5-7679-5109-3. – EDN LSGNKO;

56. Мартьянов, А. С. Определение оптимальной энергии накопителя для снижения чувствительности погружных электродвигателей добычи нефти к провалам напряжения / А. С. Мартьянов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6. – № 3. – С. 55-61. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-3-55-61. – EDN YNQDKH;

57. Архипов, Д. М. Типы электролитов и электродных материалов в конструкции симметричных суперконденсаторов / Д. М. Архипов // Инновационные технологии современной научной деятельности: стратегия, задачи, внедрение : сборник статей Международной научно-практической конференции, Казань, 25 июня 2019 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2019. – С. 12-18. – EDN CGOXSU;

58. Композиты восстановленного оксида графена с CoFe_2O_4 для электродов суперконденсаторов / П. Хе, К. Ян, В. Ван [и др.] // Электрохимия. – 2013. – Т. 49. – № 4. – С. 405. – DOI 10.7868/S0424857013040105. – EDN PWNFJP;

59. Шульга, Ю. М. Композиционные материалы на основе восстановленного оксида графена и проводящих полимеров для электродов суперконденсаторов / Ю. М. Шульга, Н. Ю. Шульга, Ю. Н. Пархоменко // Органические и гибридные наноматериалы : Пятая конференция с элементами научной школы для молодежи, Иваново, 29 июня – 02 2015 года / Ответственные

за выпуск: М.В. Ключев, Н.А. Магдалинова. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный университет", 2015. – С. 53-54. – EDN VMSXZP;

60. Гомма, Д. И. Дополнительные потери энергии при последовательном соединении суперконденсаторов / Д. И. Гомма, В. Я. Ромашко // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20. – № 3(86). – С. 37-42. – EDN XIRFBP;

61. Об особенностях процессов зарядки-разрядки суперконденсаторов / А. С. Амброзевич, С. А. Амброзевич, Р. Т. Сибатов, В. В. Учайкин // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 73-80. – EDN ZXRARR;

62. Малогабаритные резервные гибридные источники тока для зарядки суперконденсаторов / В. В. Просянюк, И. С. Суворов, А. В. Куликов [и др.] // Технологии и материалы для экстремальных условий (создание и разработка технологий изготовления электроактивных материалов для преобразователей и накопителей энергии) : материалы Всероссийской конференции, Звенигород, 14–18 декабря 2015 года / МЦАИ РАН. – Звенигород: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, 2015. – С. 143-146. – EDN VIKHDP;

63. Двойнослойный суперконденсатор для широкого интервала температур / Д. Ю. Грызлов, Т. Л. Кулова, А. М. Скудин [и др.] // Электрохимическая энергетика. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 141-147. – DOI 10.18500/1608-4039-2019-19-3-141-147. – EDN QHQALM;

64. Агеев, С. А. Перспективы применения решений на основе суперконденсаторов в железнодорожном транспорте / С. А. Агеев // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2020. – № 3(51). – С. 37-41. – EDN ZMTVIT;

65. Корнев, И. А. Использование суперконденсаторов в системах энергосбережения и обеспечения автономного хода подвижных средств электрического транспорта / И. А. Корнев, А. В. Скрипаль, Д. А. Усанов // Вопросы

прикладной физики : Межвузовский научный сборник. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 2015. – С. 86-92. – EDN VWFVPP;

66. Best Energy системы электропитания. Как устроен суперконденсатор [Электронный ресурс] / Best Energy системы электропитания. – Режим доступа: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-209> – Загл. с экрана;

67. Экспериментальные исследования токов заряда-разряда в суперконденсаторах / А. С. Амброзевич, Р. Т. Сибатов, В. В. Учайкин, Е. В. Морозова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2014. – № 4(32). – С. 164-175. – EDN TMZZMB;

68. Червоненко, А. П. Устройство компенсации провалов напряжения с накопителем энергии и функцией безударного перевода нагрузки / А. П. Червоненко, Д. А. Котин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2022. – № 10. – С. 87-96. – DOI 10.32603/2071-8985-2022-15-10-87-96. – EDN ВКТОНН;

69. Берестов В.М. Инженерная методика расчета синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / В.М. Берестов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, В.В. Панкратов, Г.Г. Ситников // Электроприводы переменного тока: Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. - Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. - С. 167 - 171;

70. Алишин, Е. В. Частотное регулирование приводов насосной станции промышленного предприятия / Е. В. Алишин, В. Б. Молодецкий // Студенческий вестник. – 2021. – № 8-3(153). – С. 36-37. – EDN STZZRI;

71. Научно-производственная корпорация «Энергетическое оборудование». БАВР 0,4 кВ [Электронный ресурс] / Научно-производственная корпорация «Энергетическое оборудование». – Режим доступа: <https://mig-energo.ru/avr-mig/bavr-04-kv/> – Загл. с экрана;

72. Яруллин, И. И. Построение систем автоматического ввода резерва с применением программируемых логических реле и контроллеров / И. И. Яруллин // Тинчуринские чтения : Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года / Под общей редакцией

Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 297-300. – EDN DJIPAL;

73. Hasanah, R. N. Arduino-Based Automatic Transfer Switch for Domestic Emergency Power Generator-Set / R. N. Hasanah, S. Soeprapto, H. P. Adi // Proceedings of 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, IMCEC 2018 : 2, Xi'an, 25–27 мая 2018 года. – Xi'an, 2018. – P. 742-746. – DOI 10.1109/IMCEC.2018.8469629. – EDN XNASMB.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023615333

**Программная реализация алгоритма
быстродействующего автоматического ввода резерва с
программируемой характеристикой выбега
асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (RU)**

Авторы: **Котин Денис Алексеевич (RU), Червоненко Андрей
Павлович (RU)**

Заявка № **2023614462**

Дата поступления **14 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **14 марта 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 68b88077c14c4010a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2025

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

кандидат экономических наук, доцент

_____ С.С. Чернов

_____ 2023 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Червоненко А.П.
«Алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов
напряжения с накопителями энергии»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ) Новосибирского государственного технического университета Червоненко Андрея Павловича, в том числе алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов напряжения с накопителями энергии, используются в учебном процессе кафедры ЭАПУ НГТУ:

- 1) при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Автоматизация электротехнических и технологических комплексов» для магистрантов факультета мехатроники и автоматизации, обучающихся по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа: Мехатронные и автоматизированные комплексы и системы;
- 2) в научно исследовательской работе бакалавров и магистрантов.

Декан ФМА НГТУ,
к.т.н., доцент

М.Е. Вильбергер

Заведующий кафедрой ЭАПУ НГТУ,
к.т.н., доцент

Д.А. Котин

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Червоненко А.П.
«Алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов
напряжения с накопителями энергии»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационного исследования, выполненного Червоненко Андреем Павловичем в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», приняты к использованию ООО «Системы Постоянного Тока» в производственной и инжиниринговой деятельности: разработка и производство системы накопления энергии (СНЭ) и проектирование устройств стабилизации постоянного напряжения (УСПН).

В частности, ООО «Системы Постоянного Тока» приняло к внедрению:

- подходы к составлению алгоритмов управления устройствами компенсации провалов напряжения;
- способ синхронизации аварийной нагрузки с накопителем электрической энергии;
- подход к составлению имитационных моделей, позволяющий оптимизировать процесс проектирования электротехнических систем.

Предлагаемые алгоритмы управления устройствами компенсации провалов напряжения могут быть использованы на реальных промышленных объектах, что в частности подтверждается их применением на лабораторном стенде электротехнического комплекса, полученном в результате диссертационного исследования.

Применение вышеперечисленных результатов позволит расширить области применения продукции, выпускаемой ООО «Системы Постоянного Тока», что даст возможность предприятию выйти на новые рынки потребителей продукции.



Колесников А.В.



IEK GROUP

РФ, 117148, г. Москва, Варшавское шоссе 28-й км,
влад. 3, тел.: +7 (495) 542-2222, 542-2223,

факс: +7 (495) 542-2220, info@iek.ru, www.iek.group

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Червоненко А.П.
«Алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов
напряжения с накопителями энергии»**

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационного исследования, выполненного Червоненко Андреем Павловичем в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», приняты к использованию ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» (коммерческое название - IEK GROUP) в качестве материалов для организации работ в рамках работы с учебными заведениями в России и Республике Беларусь, развития учебных и испытательных лабораторий.

В частности, приняты к внедрению:

- способ управления программируемым логическим реле с помощью внешнего микроконтроллера;
- подход к разработке лабораторных имитационных (испытательных) стендов;
- подходы к составлению алгоритмов управления промышленными устройствами компенсации провалов напряжения.

Предлагаемый вариант лабораторного стенда позволяет проверить и отладить алгоритмы управления устройствами компенсации провалов напряжения перед непосредственным внедрением их в технологический процесс реального промышленного объекта.

Применение вышеперечисленных результатов позволит положительно повлиять на процесс обучения персонала испытательной лаборатории компании и найти новые решения в производстве учебно-тренировочного оборудования.

Руководитель отдела по работе
с экспертными сообществами
и учебными заведениями



П.Ф. Некрасов

22 мая 2023г.

ПРИЛОЖЕНИЕ «В» СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ МАТЛАВ ИССЛЕДУЕМЫХ
МОДЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

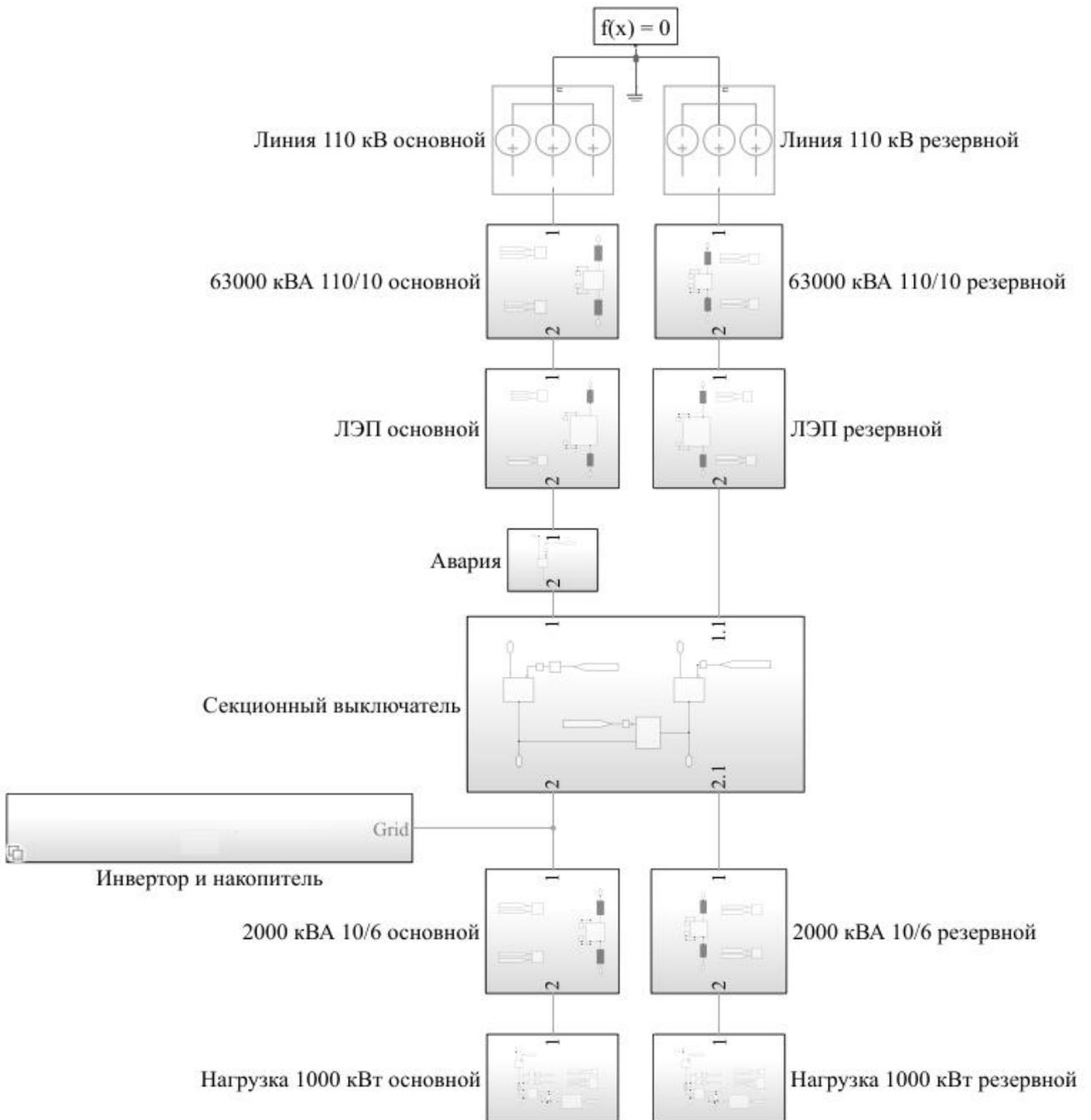


Рисунок В.1 – Структурная схема исследуемого электротехнического комплекса



Рисунок В.2 – Подсистемы выбора опыта исследуемой системы

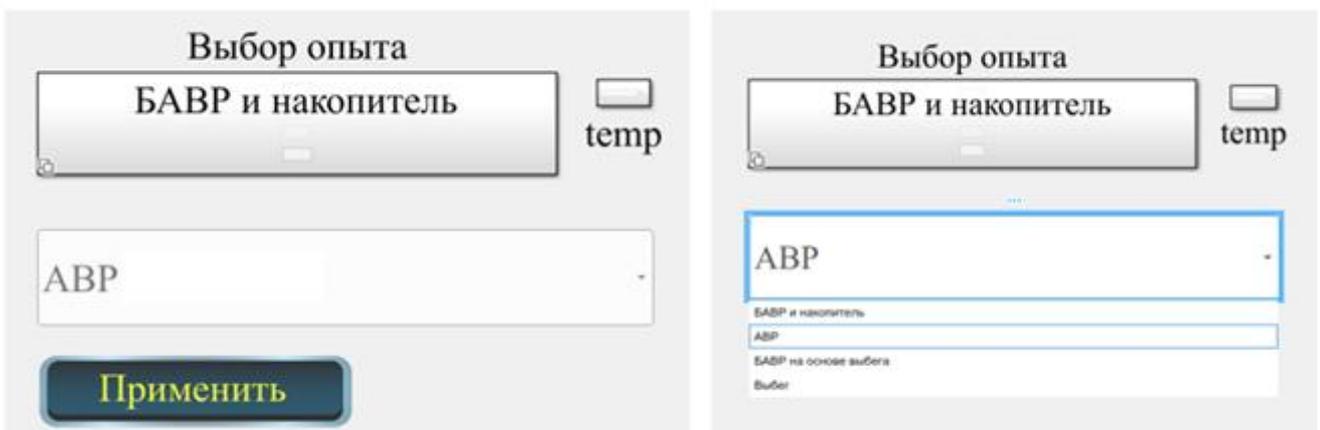


Рисунок В.3 – Графический интерфейс пользователя

```

1
2 if mode == 0%АВР
3     flag_invertor =0;
4     t_sim = 8;
5     Ts = 5e-5;
6 end
7
8 if mode == 1% Выбер
9     flag_invertor =0;
10    t_sim = 8;
11    Ts = 5e-5;
12 end
13
14 if mode == 2% БАПВ на основе выбега
15     flag_invertor =0;
16     t_sim = 8;
17     Ts = 5e-5;
18 end
19
20 if mode == 3 %БАВР и накопитель
21     t_sim = 8;
22     Ts = 5e-5;
23     flag_invertor =1;
24 end
25

```

Рисунок В.4 – Программный код, определяющий работу кнопки «Применить»

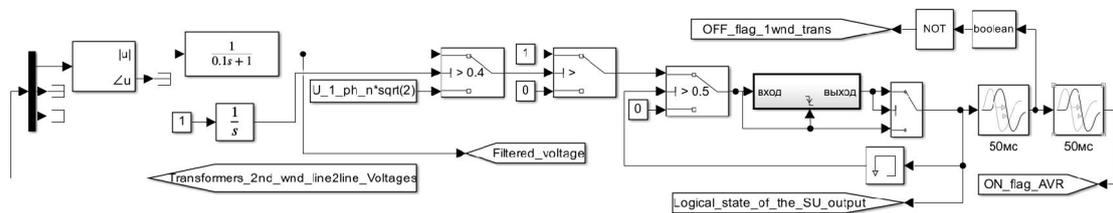


Рисунок В.5 – Структурная схема управляющей части АВР (реализация с помощью «ключей»)

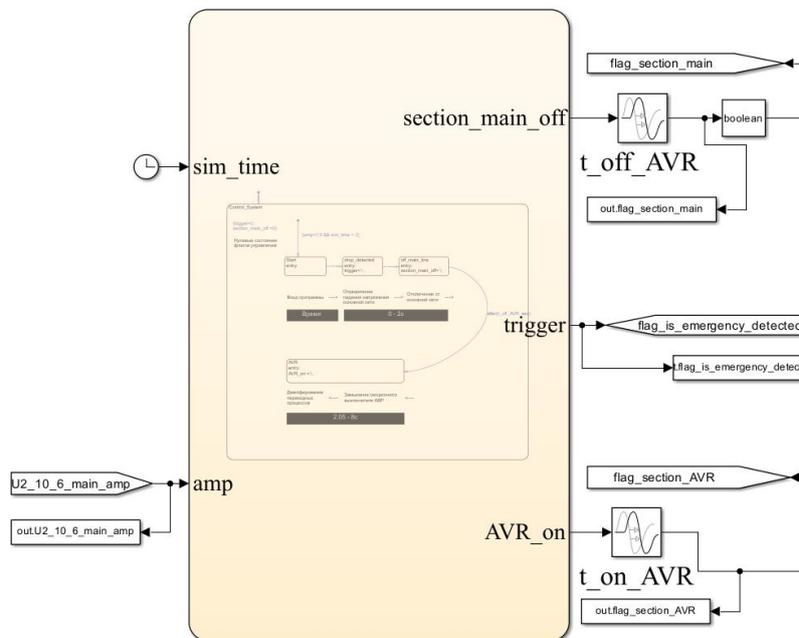


Рисунок В.6 – Структурная схема управляющей части АВР (реализация с помощью метода конечных автоматов)

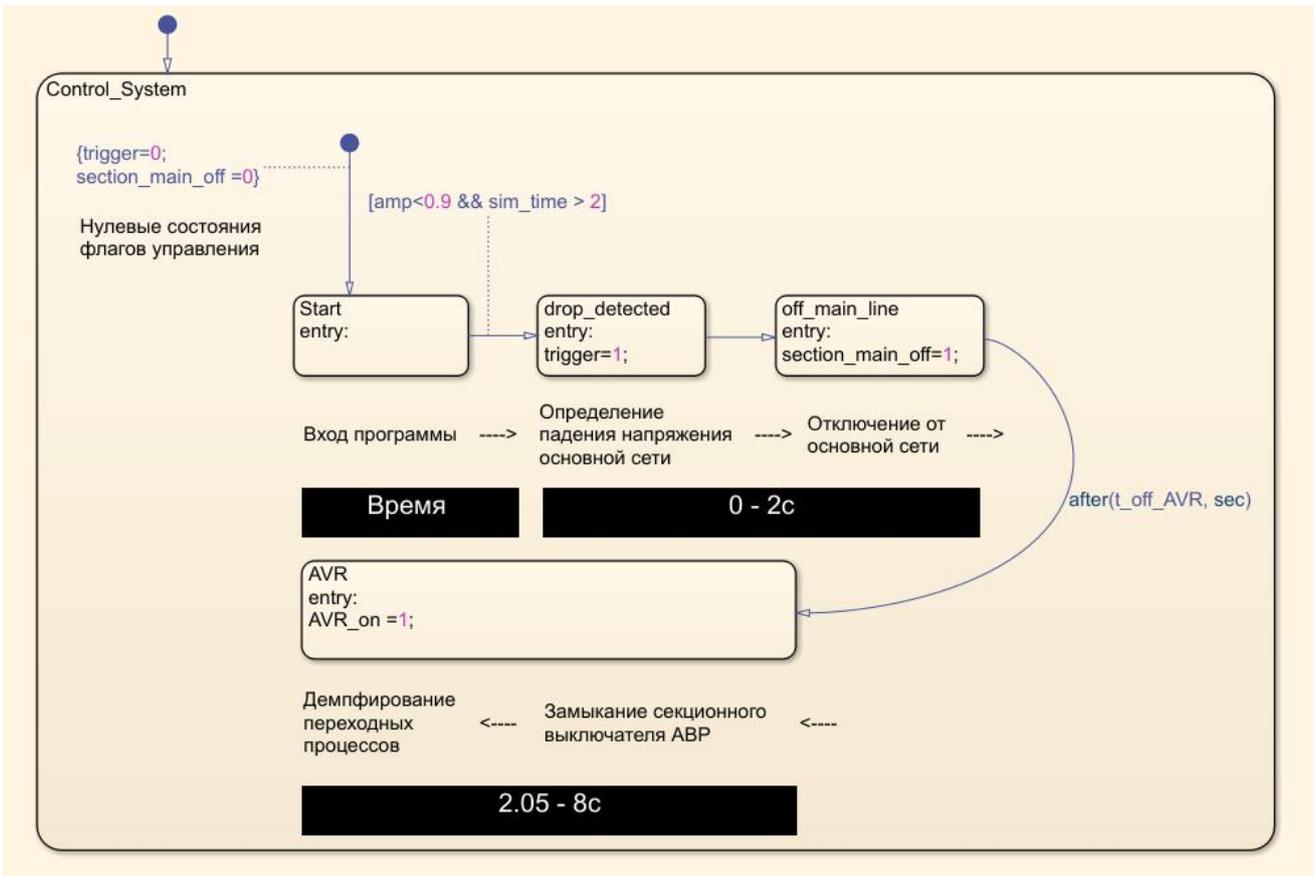


Рисунок В.7 – Внутреннее содержание блока «Система управления БАВР»

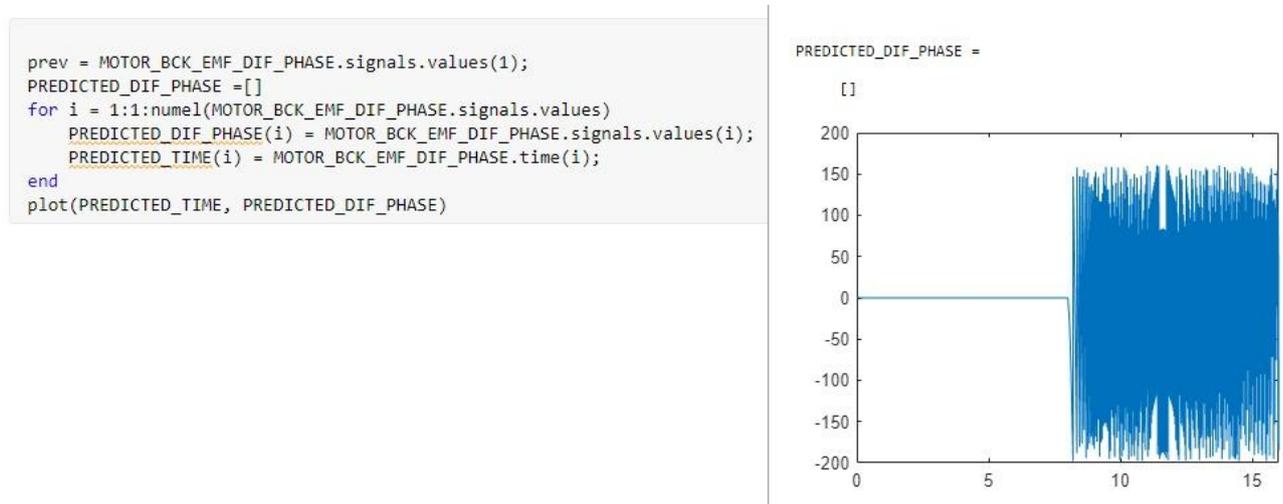


Рисунок В.8 – Скрипт преобразования записанных данных о выбеге двигателя в табличный вид

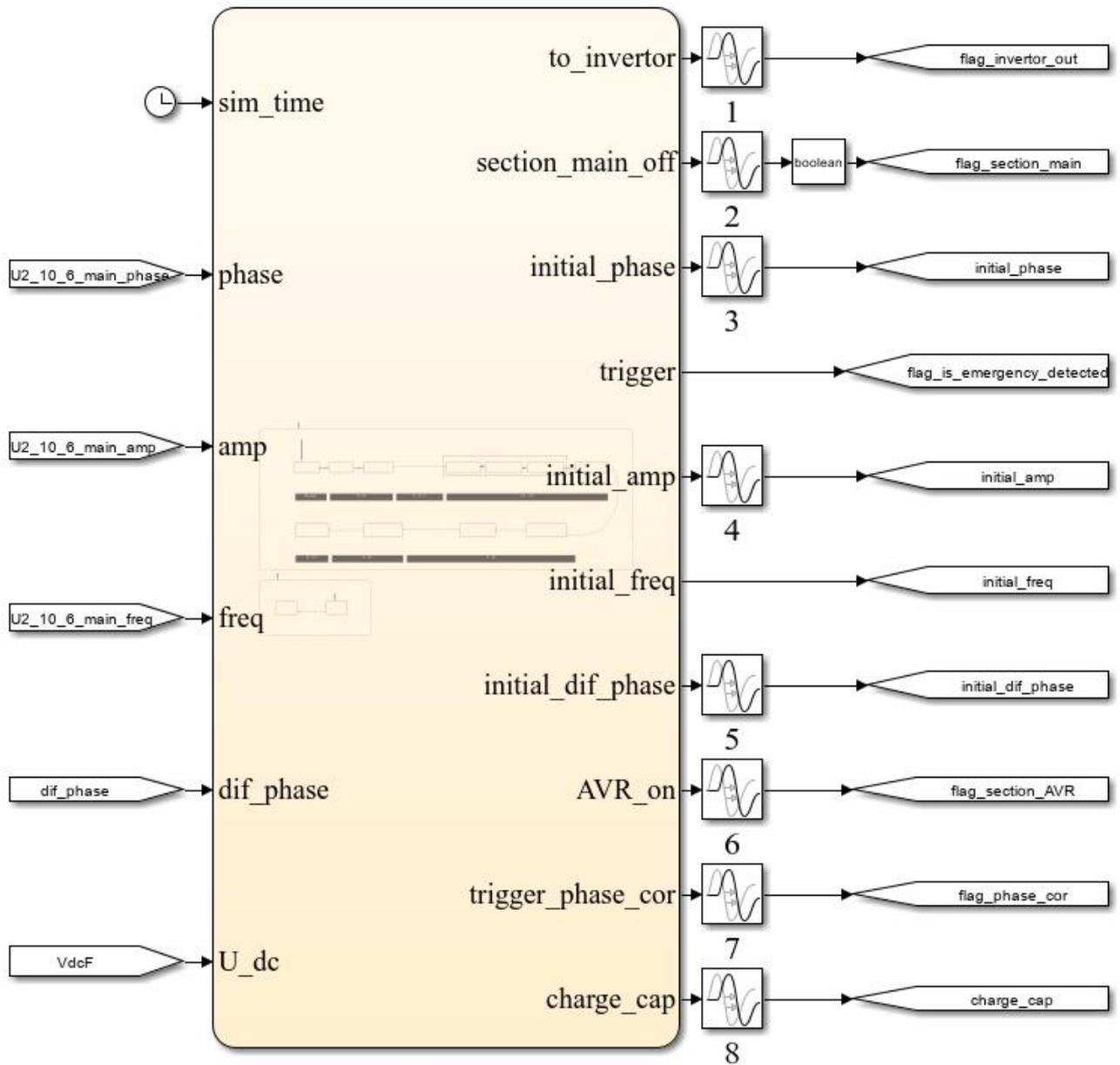


Рисунок В.9 – Подсистема управления логикой переключения нагрузки с основной сети на накопитель и резервную сеть

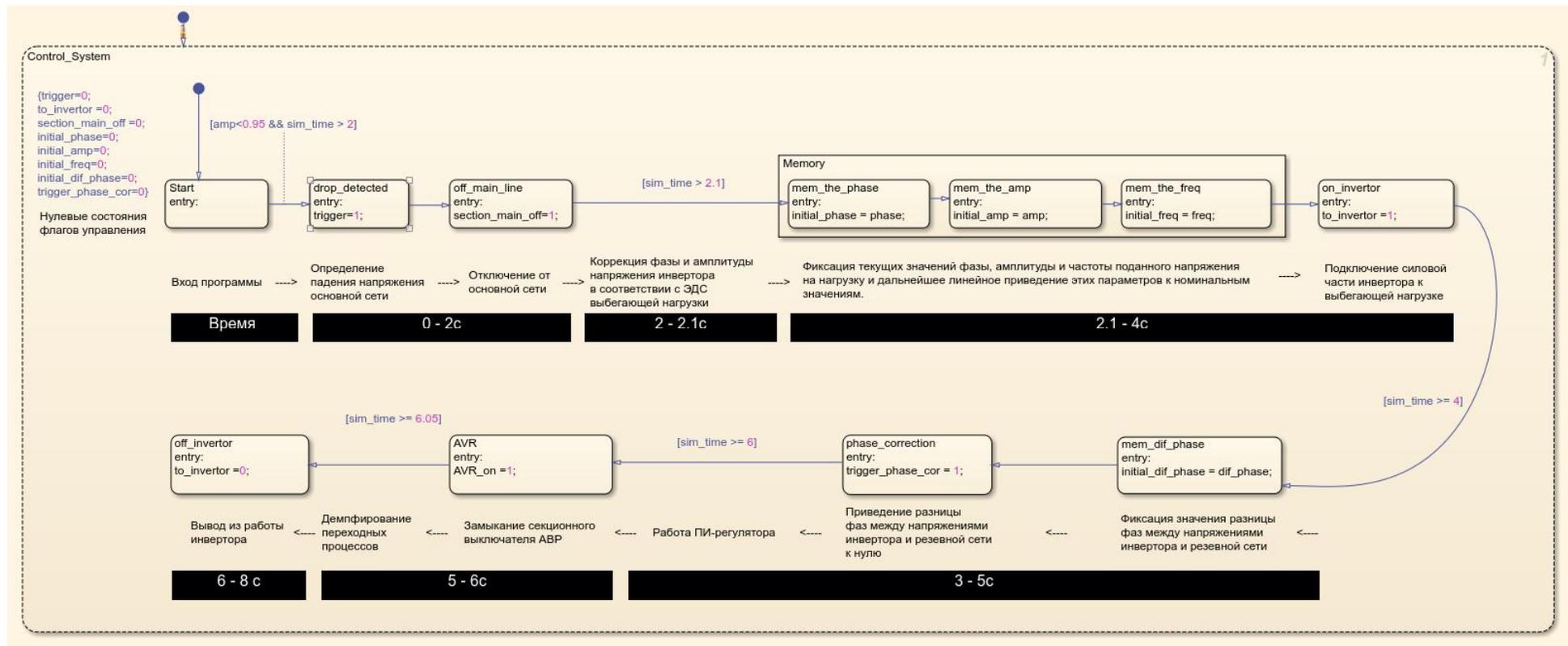


Рисунок В.10 – Структура логики системы управления БАВР с реализованным алгоритмом синхронизации фаз напряжений: основного питающего напряжения – ЭДС нагрузки и напряжения инвертора накопителя – напряжения резервной сети

ПРИЛОЖЕНИЕ «Г» ЧЕРТЕЖИ И КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ, СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

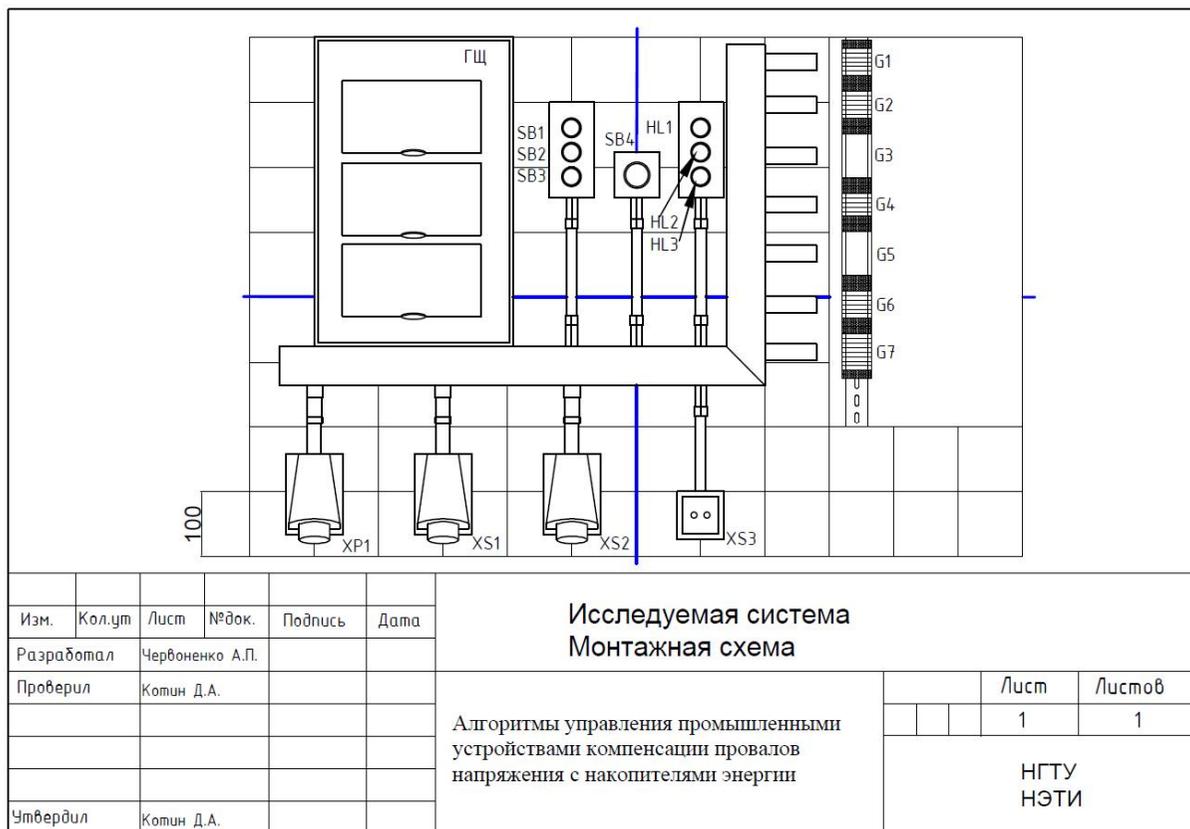


Рисунок Г.1 – Монтажная схема учебно-исследовательского стенда

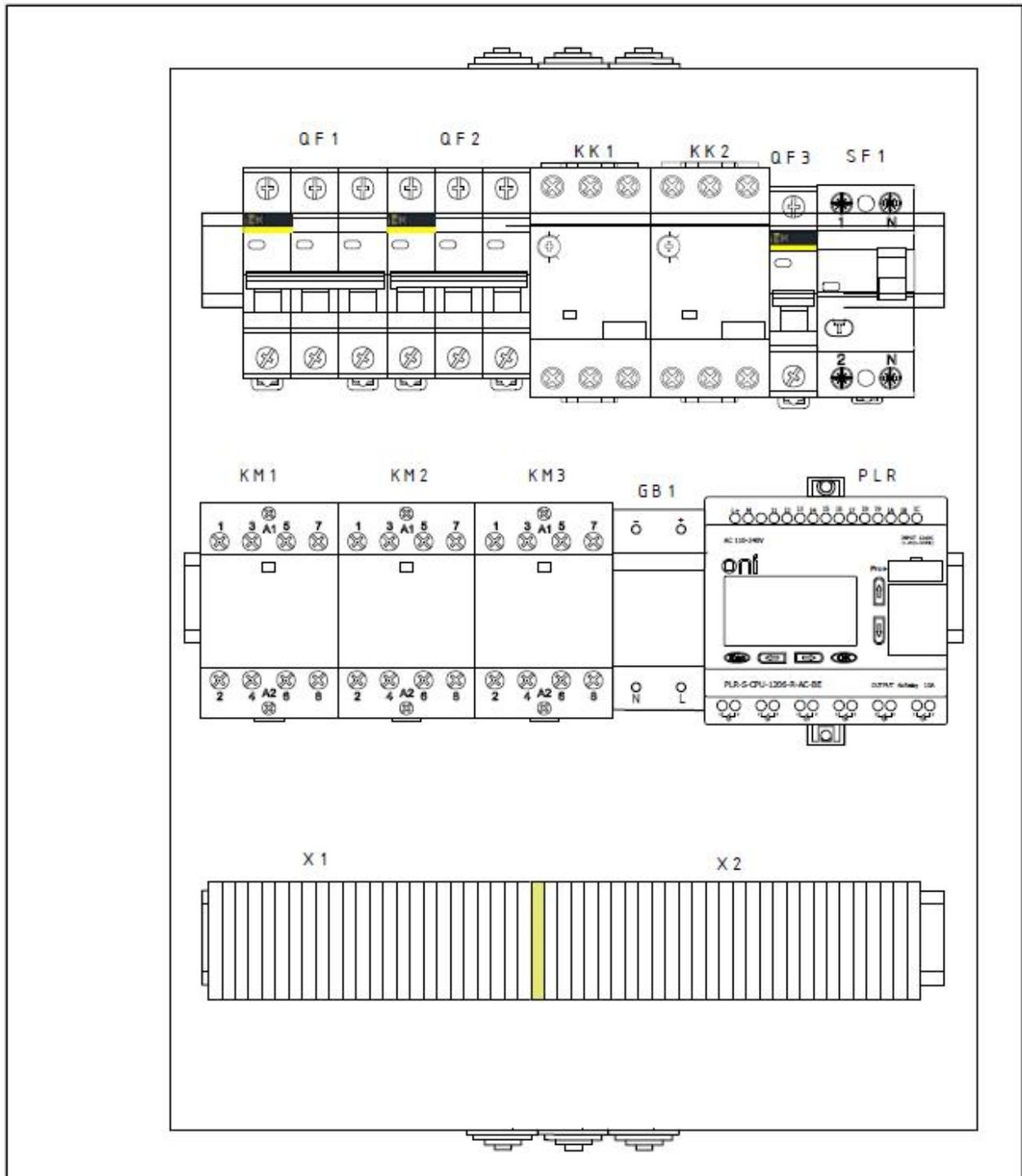
Спецификация

Обозначение	Описание	Кол-во
U1	Кабельный канал "Элекор" 60x40	1,5 м
U2	Заглушка для К.К. 60x40 "Элекор"	2 шт.
U3	Кабельный канал "Элекор" 25x16	1 м
U4	Гофротруба ПВХ Ø20	0,5 м
U5	Держатель с защелкой Ø20	14 шт.
U6	Муфта труба-коробка 20 мм IP65	10 шт.
U7	Труба гладкая жесткая ПВХ Ø20	1 м
U8	Корпус КП103 для кнопок 3 места	2 шт.
U9	Корпус КП101 для кнопок 1 места	1 шт.
Щ	Щит ЩРН-П 36	1 шт.
XP1	Стационарная вилка серии MAGNUM 3L+N+PE	1 шт.
XS1, XS2	Стационарная розетка серии MAGNUM 3L+N	2 шт.
XS3	Розетка одноместная с з/к и крышкой	1 шт.
HL1, HL2	Индикатор AD-22DS сигнальная d22мм синий	2 шт.
HL3	Индикатор AD-22DS сигнальная d22мм красный	1 шт.
SB1, SB3	Кнопка BK22-ABLF зеленый d22 230В 1з+1р	2 шт.
SB2	Кнопка BK22-ABLF красный d22 230В 1з+1р	1 шт.
SB4	Кнопка ANE-22 "Грибок" с фиксацией красный 230В 1з+1р	1 шт.
Control system	Совокупность операционного, измерительного и коммутационного оборудования	1 шт.

QF1 - трансформатор "основной" сети 110кВ / 10кВ
 QF2 - трансформатор "резервной" сети 110кВ / 10кВ
 KK1 - трансформатор "основной" сети 10кВ / 6кВ
 KK2 - трансформатор "резервной" сети 10кВ / 6кВ
 QF3 - автоматический выключатель системы управления
 SF1 - включение розетки 220В
 KM1 - выключатель "основной" сети
 KM2 - выключатель "резервной" сети
 KM3 - секционный выключатель
 GB1 - блок питания 200 AC / 12 DC для питания оборудования системы управления
 PLR - программируемое логическое реле
 XS1 - силовой разъем для подключения электродвигателя M1
 XS2 - силовой разъем для подключения электродвигателя M2
 XS3 - розетка для зарядки ноутбука во время отладки электроустановки
 HL1 - индикатор состояния выключателя основной сети
 HL2 - индикатор состояния выключателя резервной сети
 HL3 - индикатор состояния секционного выключателя
 SB1 - кнопка запуска системы
 SB2 - кнопка остановки системы
 SB3 - кнопка имитации аварии в основной линии
 SB4 - кнопка аварийного отключения

Изм.	Кол.лст	Лист	№вок.	Подпись	Дата	Исследуемая система Спецификация				
Разработал		Червоненко А.П.				Алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов напряжения с накопителями энергии		Лист	Листов	
Проверил		Котин Д.А.						1	1	
							НГТУ НЭТИ			
Утвердил		Котин Д.А.								

Рисунок Г.2 – Спецификация учебно-исследовательского стенда



Изм.	Кол.ум	Лист	№док.	Подпись	Дата	Исследуемая система Комплектация ГЩ		
Разработал		Червошенко А.П.				Алгоритмы управления промышленными устройствами компенсации провалов напряжения с накопителями энергии	Лист	Листов
Проверил		Котин Д.А.			1		1	
Утвердил		Котин Д.А.			НГУ НЭТИ			

Рисунок Г.3 – Комплектация ГЩ учебно-исследовательского стенда

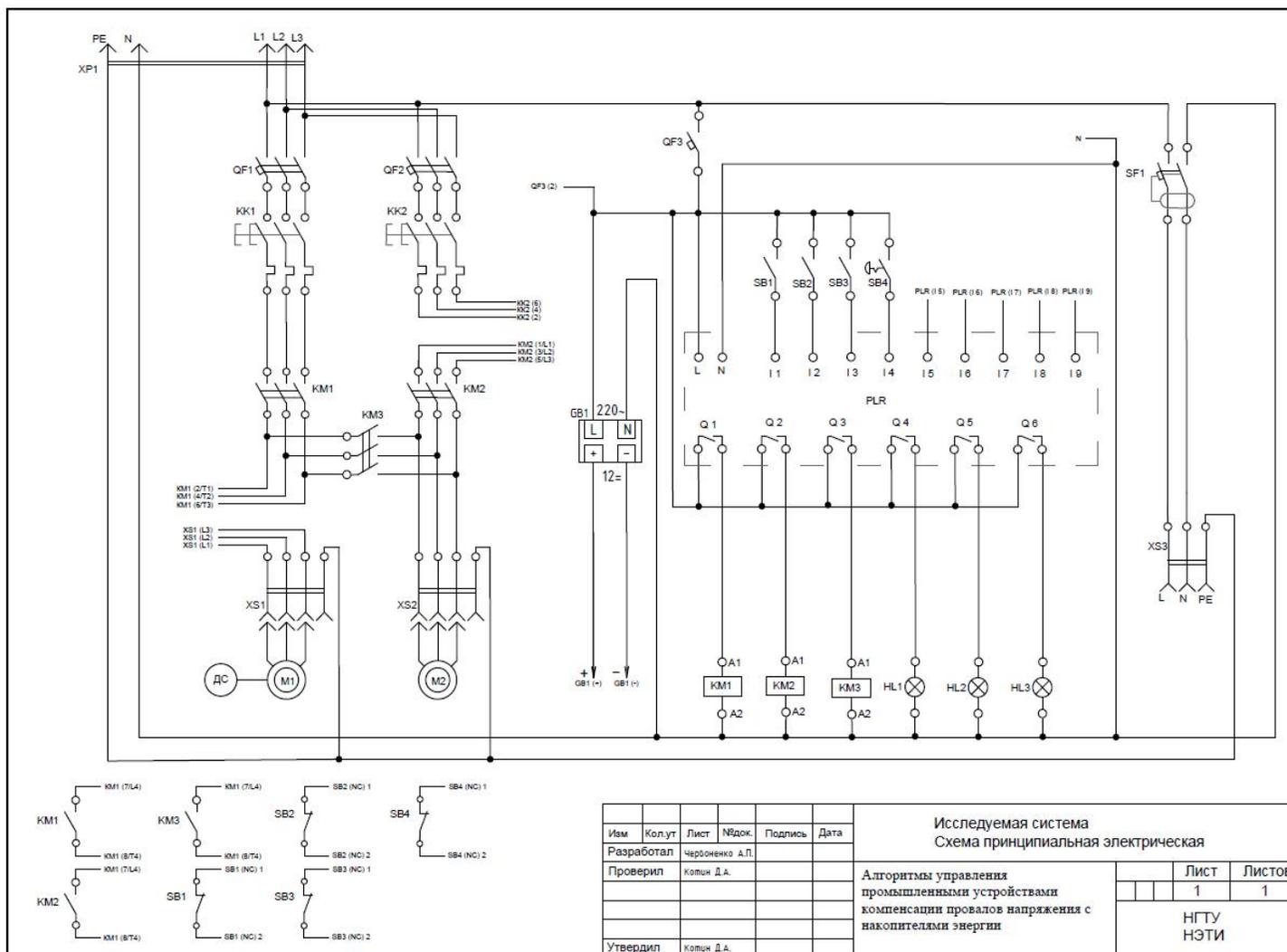


Рисунок Г.4 – Принципиальная электрическая схема учебно-исследовательского стенда

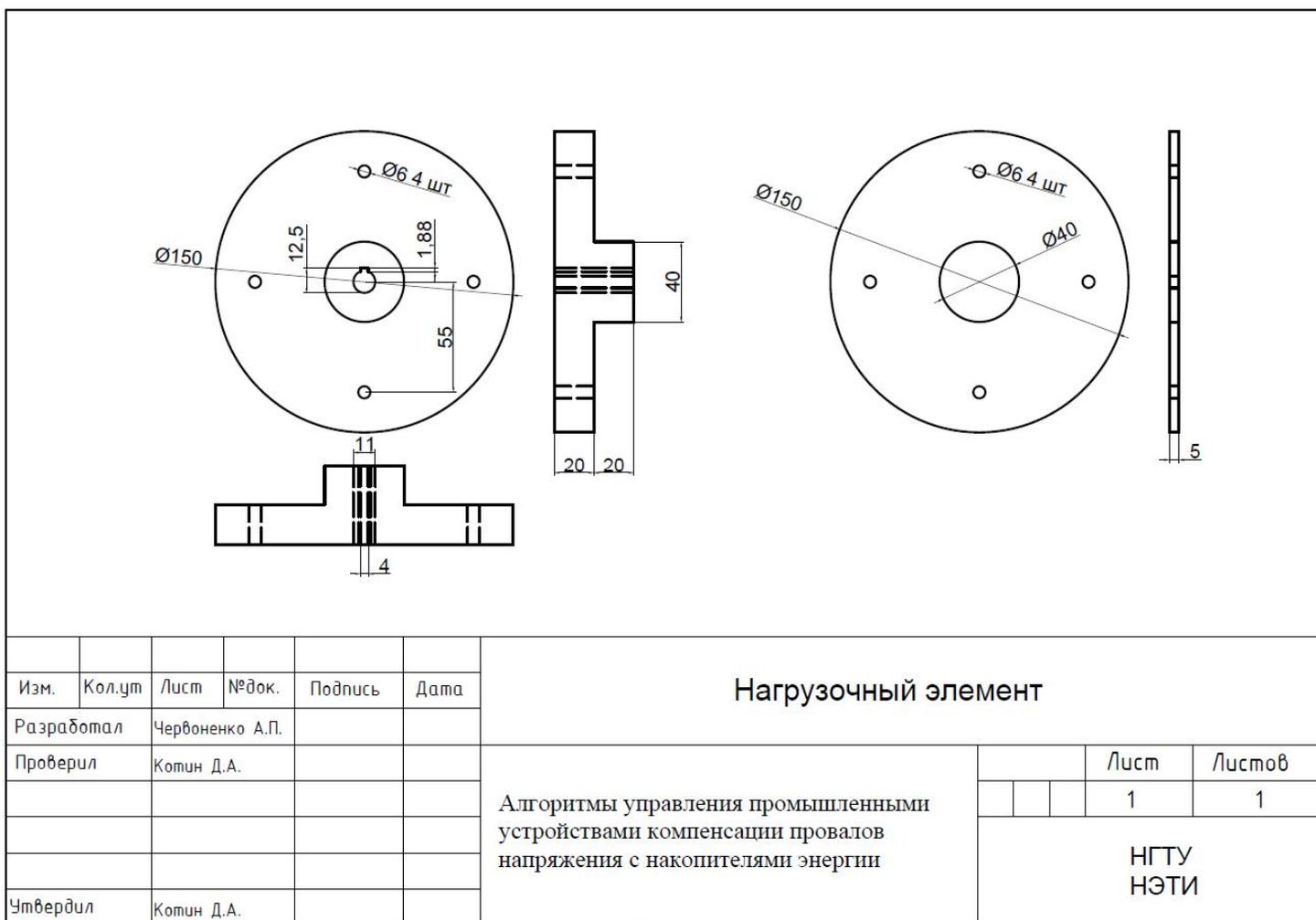


Рисунок Г.5 – Нагрузочный элемент электродвигателя учебно-исследовательского стенда

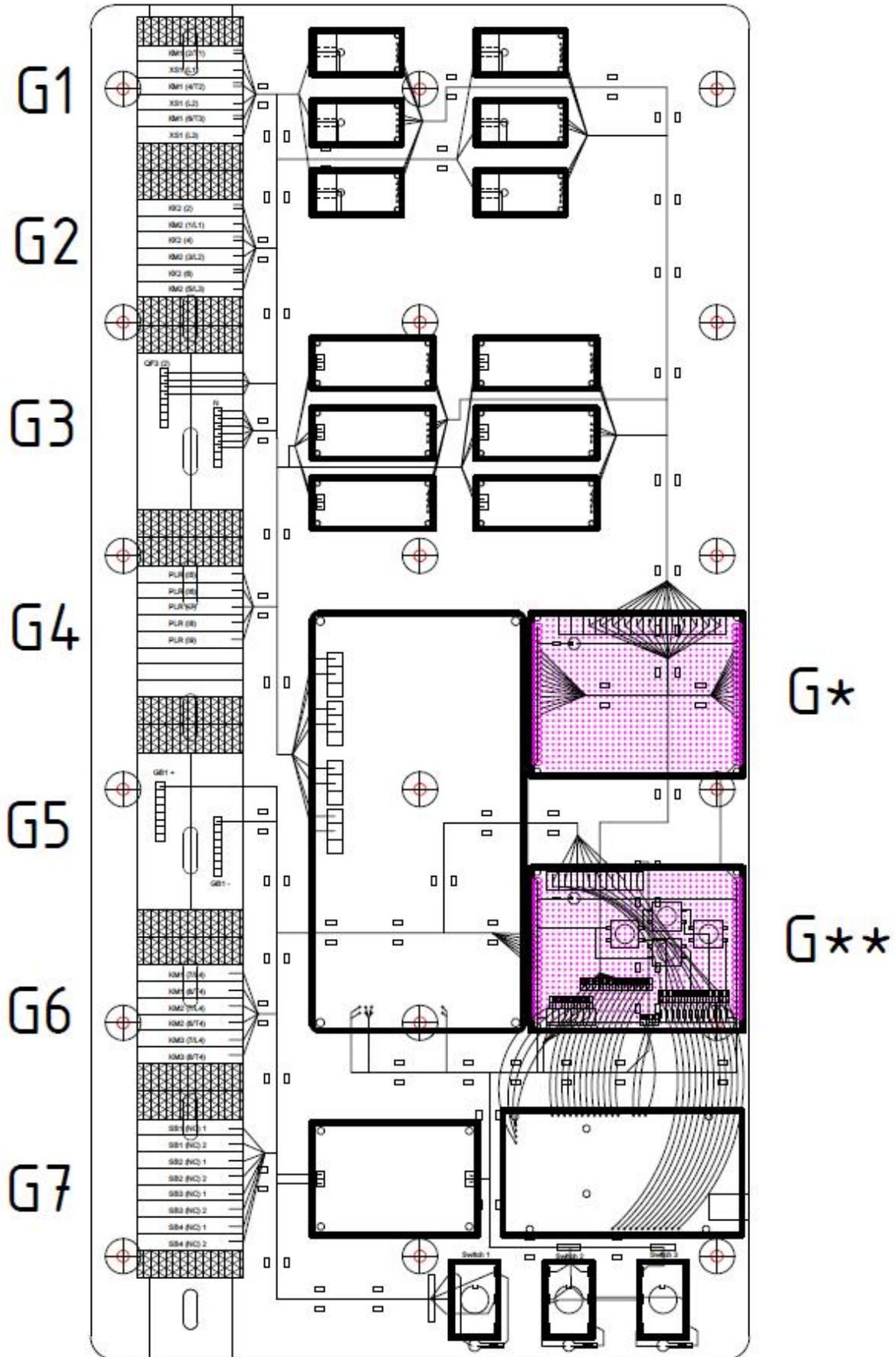


Рисунок Г.6 – Совмещенные чертежи системы управления УКПН

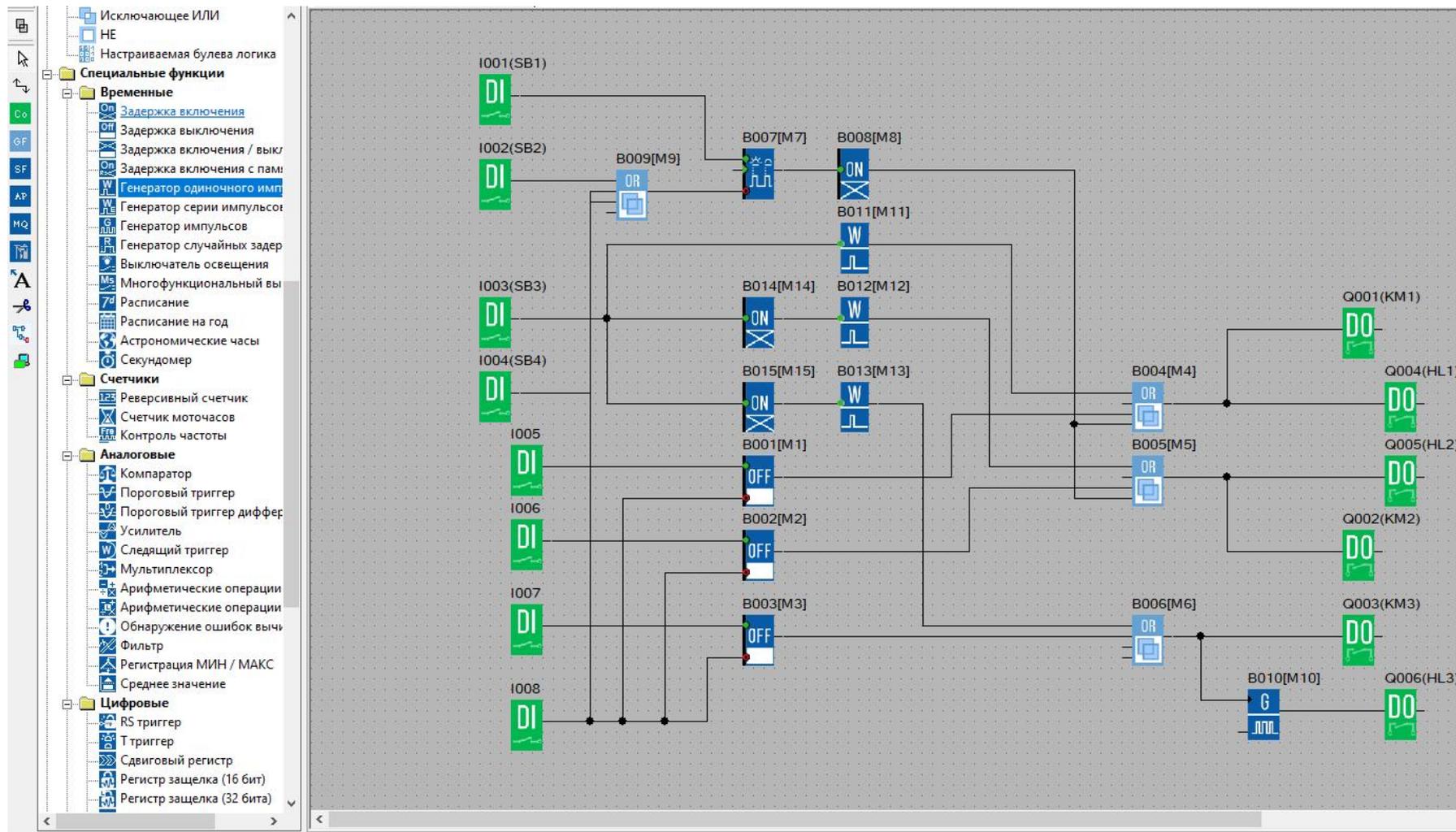


Рисунок Г.7 – Алгоритм работы ПЛР системы управления УКПН

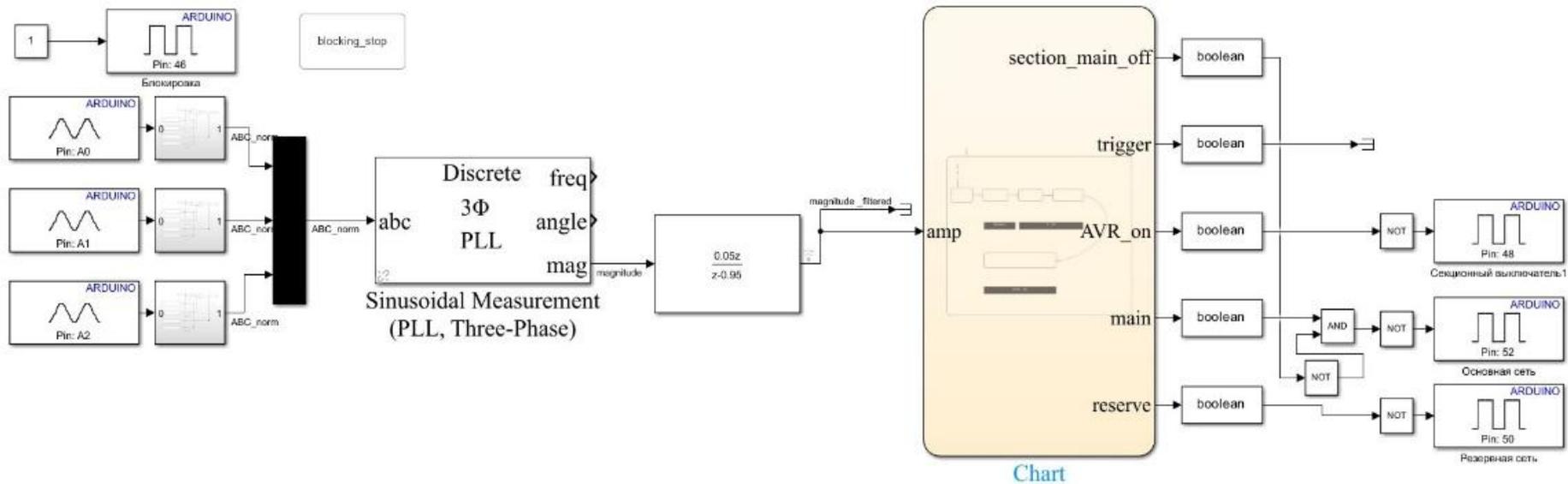


Рисунок Г.8 – Структурная схема matlab алгоритма УКПН, загружаемая в микроконтроллер