

На правах рукописи



Червоненко Андрей Павлович

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

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Котин Денис Алексеевич,**
кандидат технических наук, доцент.

**Официальные
оппоненты:** **Пупин Валерий Михайлович,**
доктор технических наук, Общество с ограниченной
ответственностью «НПК Промир» (г. Москва),
администрация, управляющий проектами;

Федотов Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Казанский
государственный энергетический университет» (г.
Казань), кафедра «Электрические станции им. В.К.
Шибанова», профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул).

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073 г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «_____» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович
Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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, так и на ожидаемый срок службы электротехнических и электротехнологических установок в его составе.

В настоящее время существуют различные технические решения, призванные компенсировать провалы напряжения и производить переключение нагрузки в случае возникновения аварии. Данные устройства отличаются сложностью реализации и, как следствие, качеством конечного результата. Причем в некоторых случаях природа происхождения провалов напряжения может оказывать влияние на применяемое устройство компенсации провалов напряжения (УКПН).

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

Изучению вопросов, связанных с разработкой и исследованием УКПН и влиянию провалов напряжения на эксплуатационные характеристики потребителей нашли свое отражение в научных работах Зацепиной В.И., Секретарева Ю.А., Меняйкина Д.А., Федотова А.И., Бахтеева К.Р. Вопросы, связанные с перебоями в работе энергосистем также подробно рассматриваются и зарубежными исследователями Liao H., Milanovic J., Rodrigues M., Gomez J.C., Morcos M.M. Но стоит отметить, что не существует универсального решения обозначенных выше проблем, 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 комплектного устройства.

В соответствии с указанной проблематикой были сформулированы следующие цели 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

Предложены и инженерно обоснованы критерии выбора устройства компенсации провалов напряжения в зависимости от условий и режимов функционирования технологического процесса, в котором электропривод (ЭП) 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 не превышение 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 БАВР, 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 БАВР, 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

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены связанные с тематикой работы научные проблемы и актуальность. Сформулированы цели и задачи, применяемые методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, реализация результатов работы, а также сведения о теоретической и практической значимости результатов диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена общим вопросам реализации существующих технических решений УКПН. В частности, рассматривается вопрос построения и топологий существующих систем электропитания промышленных предприятий.

Рассмотрен вопрос технической реализации и алгоритмов автоматического управления устройством автоматического ввода резерва, топология и назначение устройства быстродействующего автоматического ввода резерва, приводятся преимущества данного технического решения. Определяется роль использования накопителей энергии в вопросах проектирования УКПН. Отмечаются возможности

использования суперконденсаторов для исключения влияния провалов напряжения на работу ответственных электротехнических комплексов.

Электроснабжение от энергетической системы может быть реализовано несколькими топологиями. В диссертационной работе сделан выбор в пользу варианта с одной мощной главной понизительной подстанцией на все предприятие, что соответствует предприятию средней мощности с концентрированным расположением нагрузок.

Вторая глава диссертационной работы посвящена синтезу и исследованию системы управления устройствами автоматического ввода резерва (АВР) и быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР).

Осуществлен выбор объекта исследования (технологический процесс и режимы работы районной тепловой станции), конкретизированы параметры источника энергии и трансформаторов, нагрузки и уставки срабатывания выключателей АВР и БАВР. Осуществлен выбор системы электроснабжения предприятия, использующей 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 асинхронного двигателя (АД) номинальной мощностью 1 МВт. Резервная сеть по своей топологии аналогична основной.

Реализован подход взаимозаменяемости и исключения сгруппированных подструктур без ущерба для целостности всего алгоритма вычисления благодаря модульному виду общей структуры модели энергосистемы. Основным достоинством данного подхода является то, что исключение или замена любой из подструктур не влияет на работоспособность всей динамической модели в целом.

Произведено встраивание нескольких проводимых опытов в одну имитационную модель, среди них: моделирование системы АВР; модели опыта выбега асинхронного двигателя; модели БАВР, система управления которой построена на основе опыта выбега двигателя; модели БАВР в совокупности с накопителем энергии.

Составлено руководство к пользованию имитационной моделью, в котором подробно рассмотрен вопрос построения и настройки системы.

Произведено исследование системы автоматического ввода резерва, в ходе которого определен подход к составлению системы управления УКПН. В виду сложности составления алгоритма работы АВР с помощью ключей, релейных элементов с одной стороны, и для того, чтобы приблизить создаваемую систему управления к возможности ее реального исполнения и обеспечения более удобной отладки при изменении условий ее работы с другой стороны, предлагается использовать функционал раздела *matlab* «*stateflow*». Электромеханические и электрические переходные процессы, соответствующие работе АВР сопровождаются бросками тока и момента двигателя, превышающими предельно допустимые значения.

Предложен подход к составлению системы управления БАВР, построенной на опыте выбега асинхронного 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. На рисунке 1 представлен участок переходного процесса по полученному и записанному рассогласованию фаз, соответствующий началу выбега двигателя.

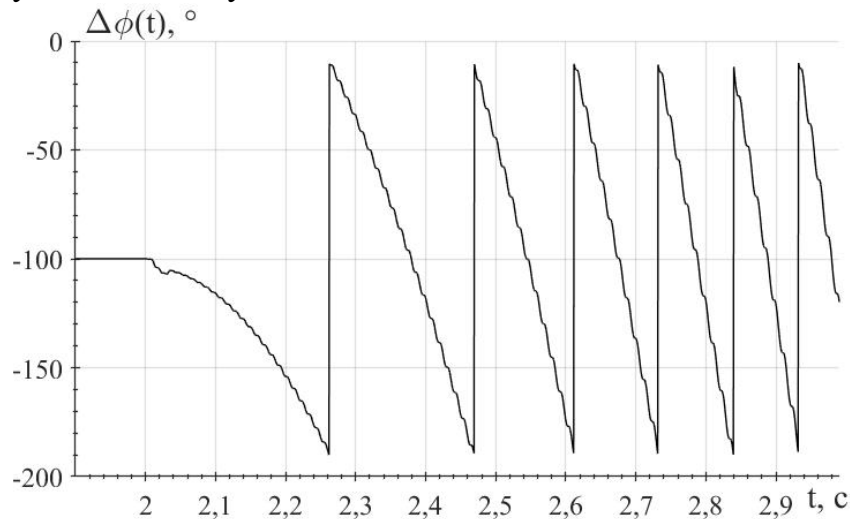


Рисунок 1 – Участок переходного процесса по рассогласованию фаз, соответствующий началу выбега двигателя

На рисунке 2 представлена структурная схема разработанной системы управления БАВР.

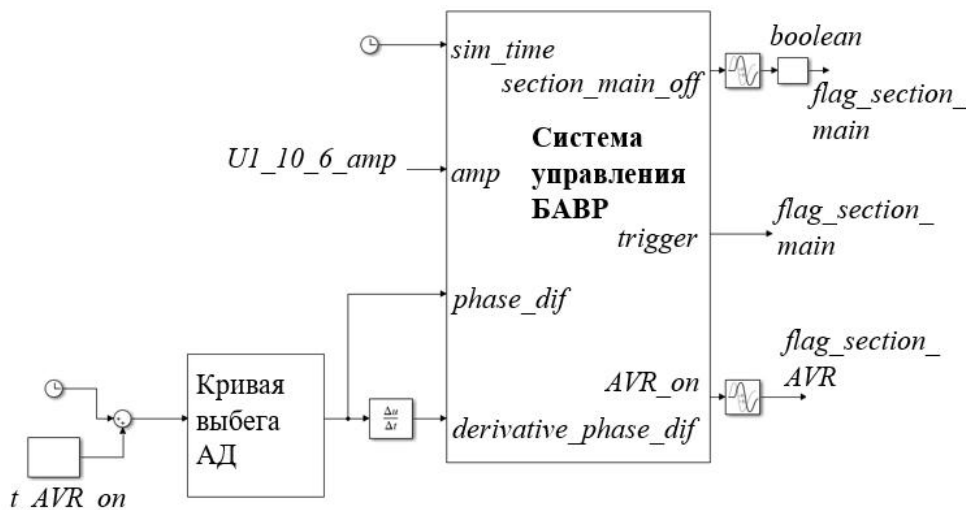


Рисунок 2 – Структурная схема разработанной системы управления БАВР

Полученную записанную характеристику ЭДС, соответствующую выбегу АД, можно использовать для предиктивного определения будущей разницы фаз ЭДС двигателя и питающего напряжения резервной сети и определения момента подачи 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.

Для определения оптимальной величины отклонения питающего напряжения от номинального значения и допустимого диапазона рассогласования фаз была проведена серия исследований на цифровой модели. На рисунке 3 приведены электромеханические переходные процессы, соответствующие наилучшему полученному результату.

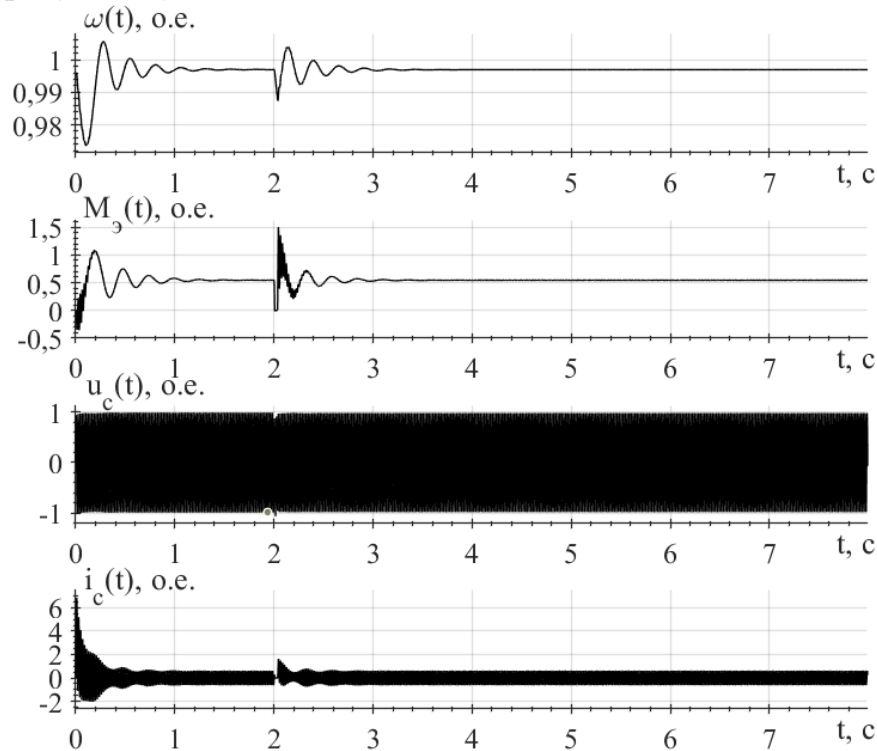


Рисунок 3 – Электромеханические и электрические переходные процессы двигателя (10%, ± 15 градусов)

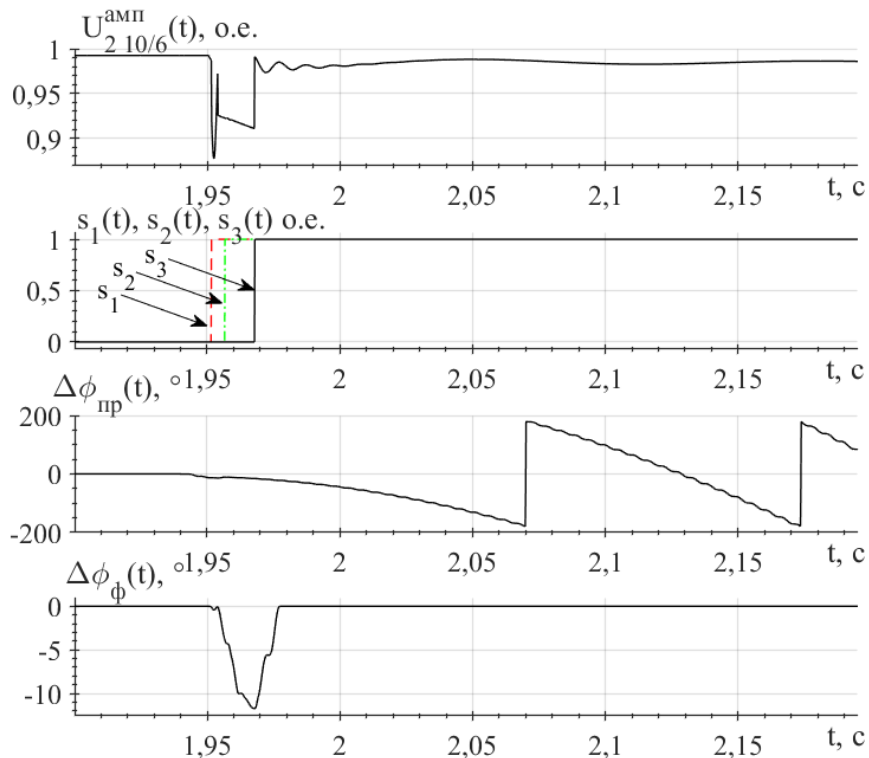


Рисунок 4 – Переходные процессы переменных системы управления (укрупненно момент включения)

Поясним изображенное на рисунке 4. 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, $\Delta\phi_{\text{пр}}$ – предсказанное рассогласование фаз с учетом задержек, $\Delta\phi_{\text{ф}}$ – фактическое рассогласование фаз.

Результатом проведенных опытов является определение в качестве оптимальных параметров 10% просадки по питающему напряжению и диапазон по рассогласованию фаз в ± 15 градусов. В случае превышения величины уставки определения аварии свыше 10%, графики электромеханических переходных процессов характеризуются наличием бросков по моменту и току двигателя, превышающими предельно допустимые значения. Уменьшение «коридора» допустимого рассогласования фаз ниже ± 15 электрических градусов является нецелесообразным (по причине возможного пропуска алгоритмом управления разрешенного момента переключения).

Определены перспективы использования системы управления БАВР, построенной на опыте выбега АД. Они прежде всего связаны с прогнозированием поведения системы с использованием глубокого обучения. В работе приведен пример и порядок действий прогнозирования данных временных рядов с использованием сети *LSTM*. Предлагаемый подход связан с невозможностью получения единственно истинного графика 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 диапазоном ± 15 градусов разницы фаз добавится случайная неконтролируемая величина, требующая учета в алгоритме управления. Устранение вышеописанных недостатков возможно при помощи использования средств нейросетевого обучения и нечеткой логики.

Третья глава диссертационной работы посвящена синтезу и исследованию системы управления устройством компенсации провалов напряжения с накопителем электрической энергии.

Определено место включения накопителя – потенциально аварийный участок системы электроснабжения ответственного потребителя электрической энергии. Технический смысл использования накопителя: компенсация кратковременной пропажи напряжения питания; обеспечение антидребезга системы электроснабжения тогда, когда технически не рационально осуществлять переключение нагрузки с основной сети на резервную.

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. (емкость одного модуля составляет 50 Ф, напряжение – 162 В).

На рисунке 5 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.

По переключению нагрузки на накопитель энергии формируются линейно возрастающие амплитуда и частота напряжения инвертора вплоть до номинальных значений. Таким образом, нагрузка через некоторый промежуток времени восстанавливает номинальные параметры технологического процесса.

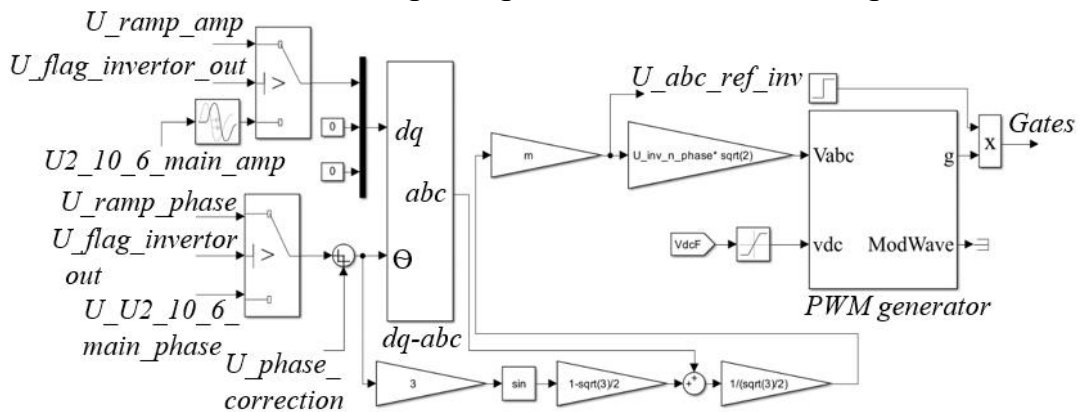


Рисунок 5 – Структурная схема формирования задающего сигнала на напряжение (U_{abc}) для ШИМ генератора инвертора накопителя

Произведен расчет синусного фильтра, устанавливаемого на выходе инвертора. Согласно рассчитанным данным $C_{\phi}=1,268$ мФ; $L_{\phi}=26,634$ мкГн. Расчет значений емкости и индуктивности фильтра производился в соответствии со следующими формулами

$$C_{\phi} = \frac{Y_f^*}{\omega_0 \cdot Z_b}, \quad (1)$$

$$L_{\phi} = \frac{X_f^* \cdot Z_b}{\omega_0}, \quad (2)$$

где Y_f^* – емкостная проводимость фильтра, ω_0 – частота выходного напряжения инвертора, Z_b – базовое сопротивление, X_f^* – индуктивное сопротивление фильтра.

На рисунке 6 представлена структура регулятора разницы фаз напряжений инвертора и резервной питающей сети. Сигналом задания для данной структуры является переменная нарастающего сигнала задания фазового рассогласования ($U_{ramp_dif_phase}$), при этом сигнал отрицательной обратной связи приведен к диапазону значений от $-\pi$ до π .

В промежуток с 2 по 2,1 секунды осуществляется синхронизация фазы напряжения инвертора с фазой ЭДС выбегающей нагрузки. В следствие точной синхронизации кратность ударного момента и броска тока не превышают 1,35 от текущего значения момента и тока статора двигателя.

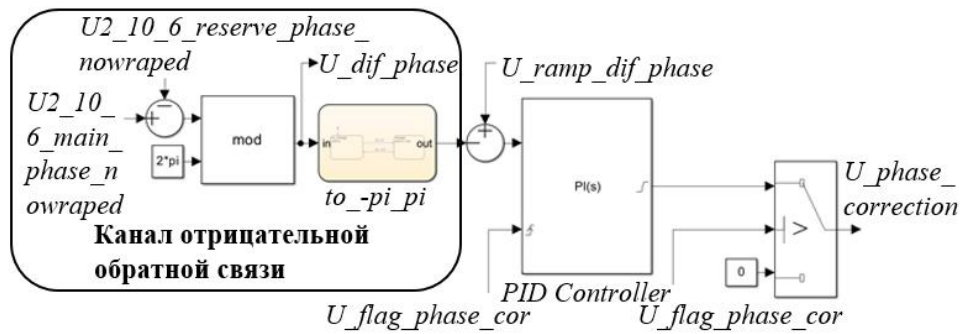


Рисунок 6 – Структура регулятора разницы фаз напряжений инвертора и резервной питающей сети

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 ($U/f = const$). 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.

На рисунке 7 представлен переходный процесс разницы фаз между напряжением инвертора, питающим нагрузку и вторичной обмоткой трансформатора 10/6 кВ резервной сети и переходный процесс сигнала выхода ПИ-регулятора. В момент времени 4 секунды осуществляется сброс интегратора ПИ-регулятора с последующей коррекцией разницы фаз до нулевого значения.

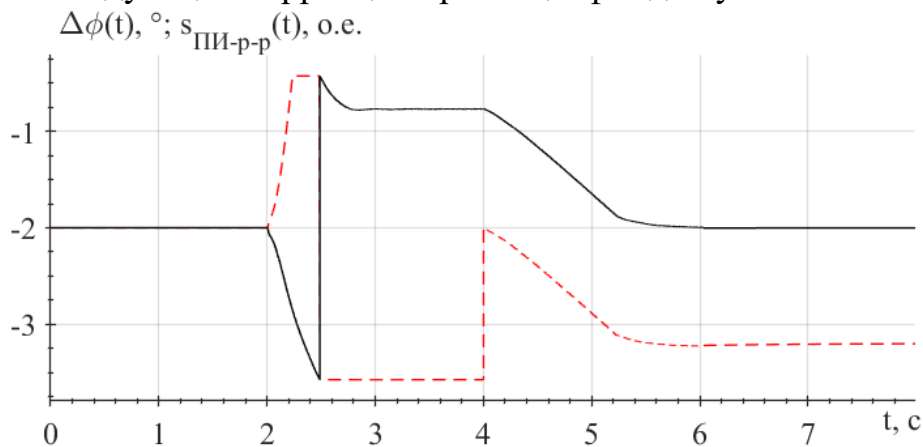


Рисунок 7 – Разница фаз между напряжением инвертора, питающим нагрузку и вторичной обмоткой трансформатора 10/6 кВ резервной сети (сплошная линия), выход ПИ-регулятора (пунктирная линия)

На рисунке 8 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.

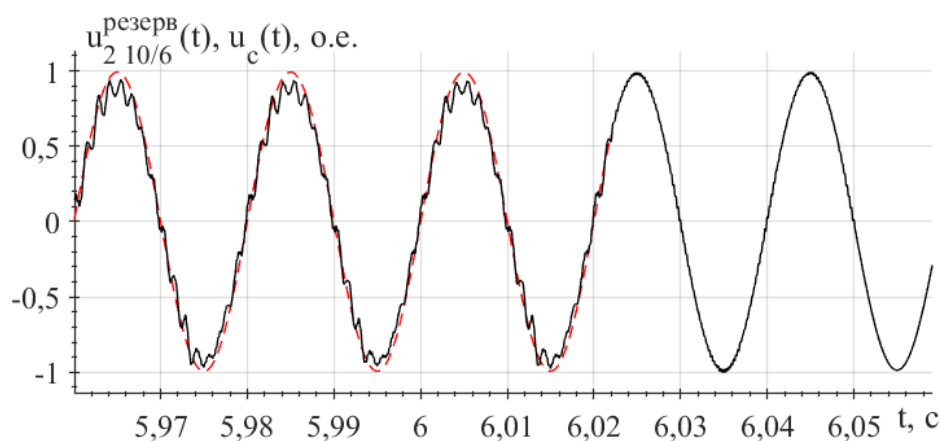


Рисунок 8 – Напряжение обмотки статора двигателя основной сети и напряжение на вторичной обмотке трансформатора 10/6 кВ резервной сети

На рисунке 9 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.

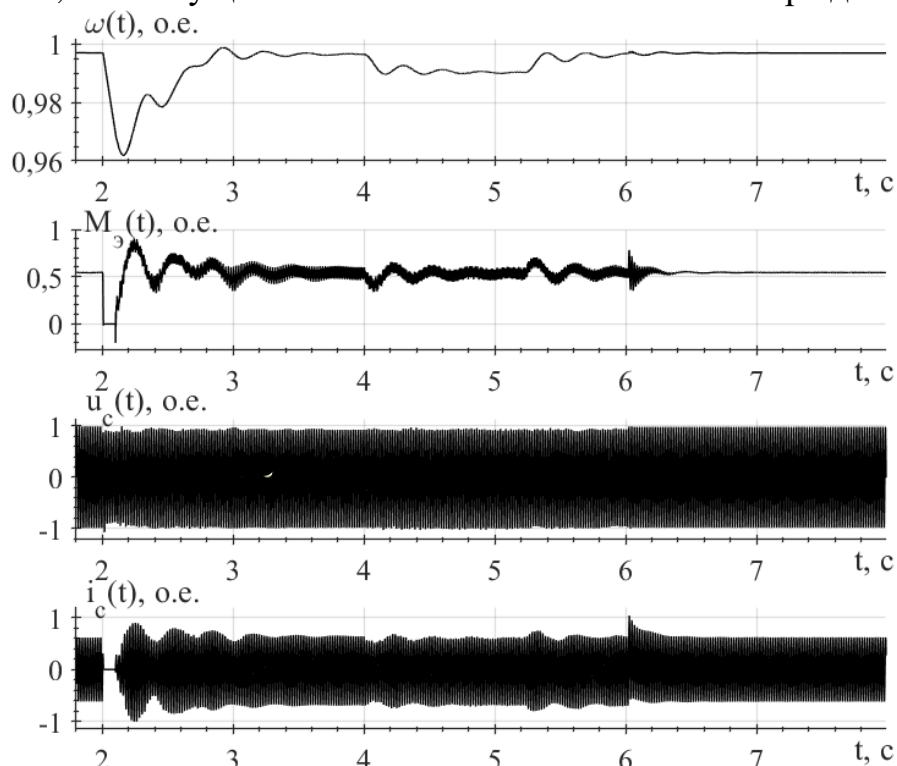


Рисунок 9 – Частота вращения, момент, напряжение и ток статора асинхронного двигателя при работе УКПН с накопителем энергии

Для имитационного моделирования технологического процесса и технологического оборудования в диссертационном исследовании используются данные сетевого насоса СЭ 1250-140-11.

По графикам переходных процессов, приведенных на рисунке 10 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. «Первый предел» и «Второй предел» – уставки срабатывания защит, где сначала происходит предупредительная сигнализация оператору насосной станции, а далее автоматический останов технологического процесса, выполняемого насосом.

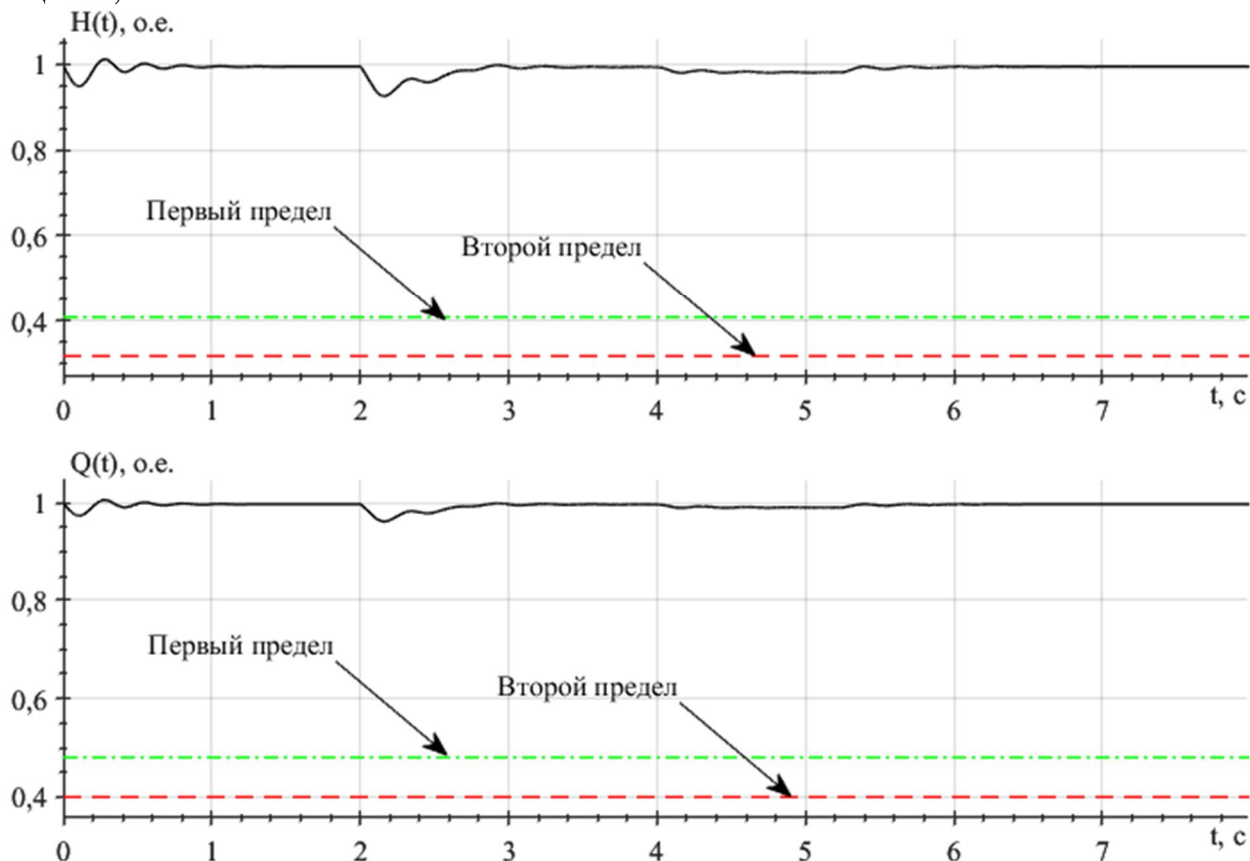


Рисунок 10 – Технологические параметры насоса для БАВР при переключении на накопитель энергии и резервную сеть

Для исследования разработанных алгоритмов управления в составе электротехнического комплекса с частотно-регулируемым электроприводом была смоделирована схема, источником напряжения в которой выступает обобщенный конденсатор, являющийся приближением реального звена постоянного тока (ЗПТ) высоковольтного преобразователя частоты (ПЧ). К данному конденсатору в качестве нагрузки подключен блок, имитирующий следующий алгоритм работы: при значениях напряжения на нагрузке в диапазоне от номинального до минимального имитационная модель представляет нагрузку постоянной мощности; при достижении минимально допустимого значения напряжения (80 % от номинального) имитационная модель нагрузки ведет себя как активное сопротивление.

На рисунке 11 представлены графики переходных процессов по напряжению на конденсаторе, его току, потребляемой мощности и уставке минимального напряжения.

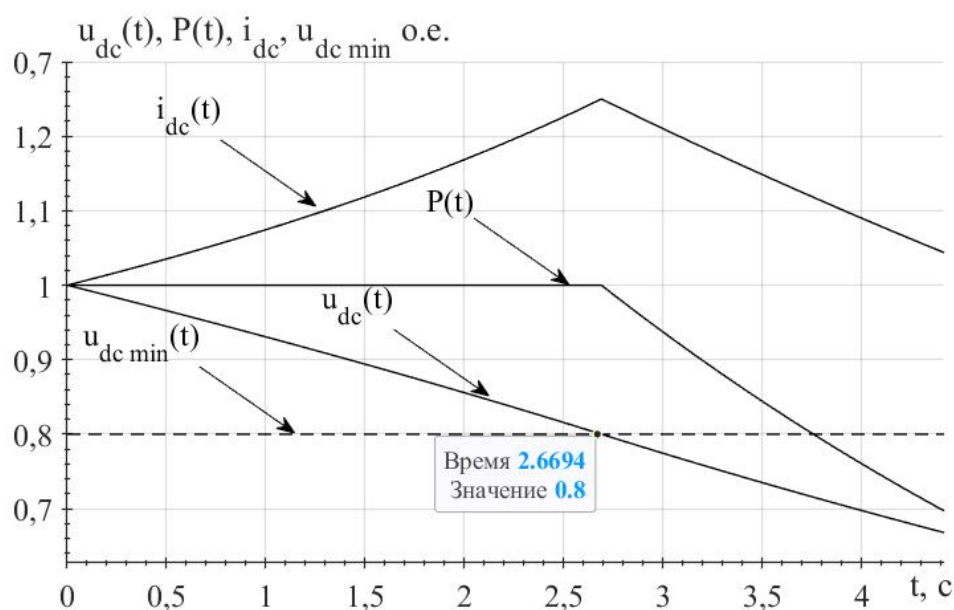


Рисунок 11 – Переходные процессы, характеризующие процесс разряда емкости ЗПТ высоковольтного ПЧ

Время достижения минимального напряжения ЗПТ при нагрузке мощностью 1 МВт составляет 2,67 секунды. Данное время больше времени срабатывания разработанного устройства БАВР, что гарантирует бесперебойность работы электротехнического комплекса с устройством БАВР в своем составе.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке учебно-исследовательского стенда электротехнического комплекса с УКПН.

Разработаны чертежи и сопроводительная конструкторская документация стенда.

На рисунке 12 представлен внешний вид реального исполнения собранного учебно-исследовательского стенда.



Рисунок 12 – Общий вид спроектированного учебно-исследовательского стенда

В состав системы управления 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.

Программа для программируемого логического реле составлена на языке функциональных блоковых диаграмм.

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.

На рисунке 13 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.

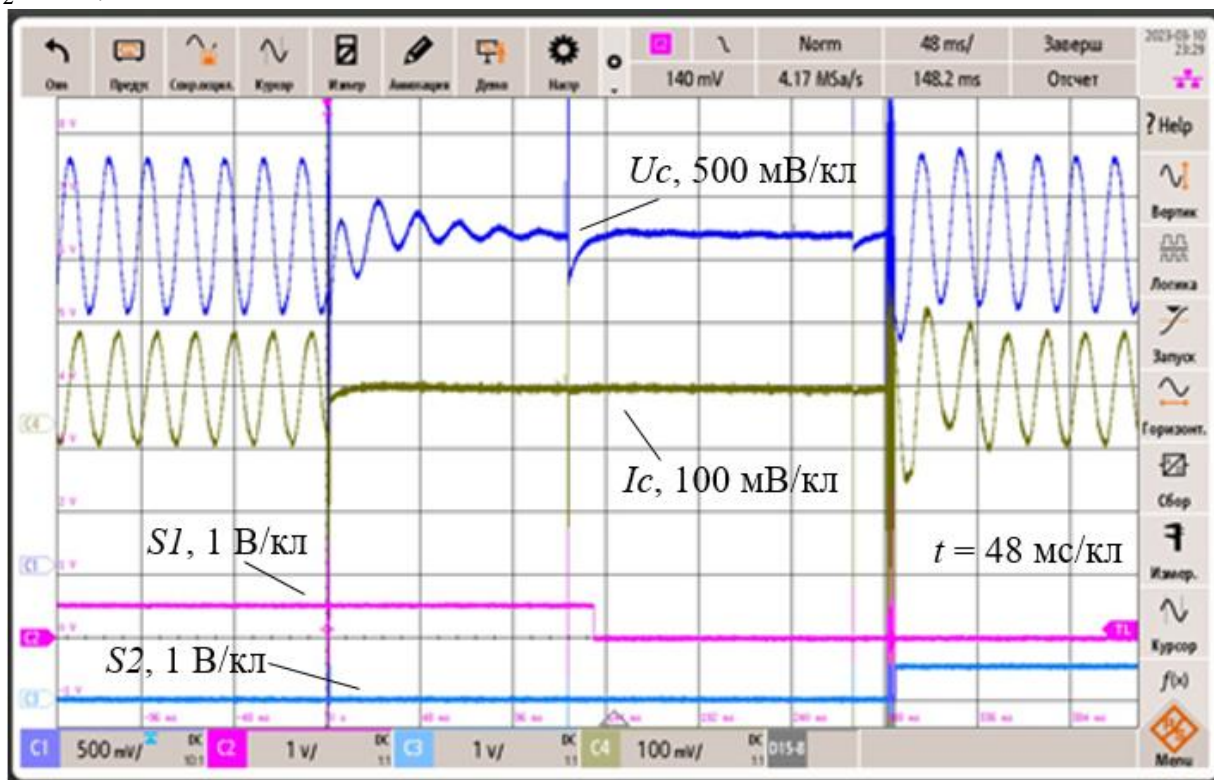


Рисунок 13 – Логические и электрические переходные процессы в основной сети

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 БАВР используется опыт выбега асинхронного двигателя. Представлены перспективы использования системы управления БАВР, 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 натурных экспериментов подтверждают практическую применимость разработанных алгоритмов управления устройствами УКПН.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Червоненко А.П., Котин Д.А., Домахин Е.А. Безударный перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением быстродействующего автоматического ввода резерва // Журнал "Электротехника", 2022, №5. (DOI: 10.53891/00135860_2022_5_18). Переводная версия: Chervonenko A.P., Kotin D.A., Domakhin E.A. Load Soft Switching between the Main Power Grid and the Backup Grid by Fast Automatic Transfer Switching // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93, iss. 5. – P. 299–304.

2. 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. №5. (DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171).

3. Червоненко А.П., Котин Д.А. Моделирование тиристорных преобразователей в среде matlab с учетом особенностей их практической реализации // Вестник Чувашского университета. 2020. №3. (DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-150-165, УДК 621.314.6, ББК 31.291-04).

Другие журнальные публикации:

4. 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

Публикации в материалах международных конференций, входящих в базу данных Scopus, Web of Science:

5. 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 // 10 International conference on electrical power drives systems, ICEPDS 2018 : conf. proc., Novocherkassk, 3–6 Oct. 2018. – Novocherkassk : IEEE, 2018. – P. 1-6. - ISBN 978-1-5386-4714-1. - DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571519.

Труды конференций:

6. Червоненко, А. П. Алгоритм безударного перевода нагрузки устройством компенсации провалов напряжения с накопителем энергии / А. П. Червоненко, Д. А. Котин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 25–27 октября 2022 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 385-388. – EDN VIADIY.

7. Червоненко, А. П. Разработка систем управления устройствами компенсации провалов напряжения в сетях промышленных предприятий / А. П. Червоненко, Д. А. Котин // XXIII Всероссийская конференция по

автоматизированному электроприводу (АЭП 2022) : Сборник докладов конференции, Тула, 28 сентября – 01 2022 года / Под редакцией О.В. Горячева. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 52-56. – EDN PJJYUL.

8. Червоненко А.П., Котин Д.А. Разработка системы управления быстродействующим автоматическим вводом резерва // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. 528 с. (УДК 621.3:004(063), ББК 381:321Я73, ISBN 978-5-7677-3483-2).

9. Червоненко А. П. Виртуальный учебно-методический комплекс «Математическое моделирование систем и элементов электропривода» / А. П. Червоненко ; науч. рук. Д. А. Котин // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 171-174. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3418-5, ISBN 978-5-7782-3423-9 (ч. 5).

10. Червоненко А. П. Разработка и исследование уточненной математической модели трехфазного мостового выпрямителя / А. П. Червоненко ; науч. рук. Д. А. Котин // Интеллектуальный потенциал Сибири. МНСК–2017 : сб. науч. тр. 25 межвуз. (регион.) науч. студ. конф., Новосибирск, 24–25 мая 2017 г. : в 23 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 20. Автоматизированный электропривод, электроника, мехатроника. – С. 46-51. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3264-8 (ч. 20).

Свидетельство на программу для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023615333 Российская Федерация. Программная реализация алгоритма быстродействующего автоматического ввода резерва с программируемой характеристикой выбега асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. / Д.А. Котин, Е.А. Домахин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». - № 2023615333; заявл. 14.03.2023; опубл. 14.03.2023. – 1 с.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ Р-02543. Подписано в печать 12.10.2023 г