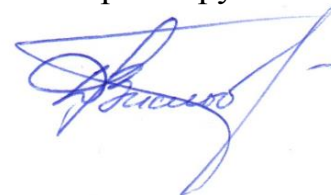


На правах рукописи



Вислогузов Денис Петрович

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ФУНКЦИЕЙ РЕЗЕРВНОГО
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Котин Денис Алексеевич

Официальные оппоненты:

Однокопылов Георгий Иванович, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения «Электроэнергетики и электротехники»

Плотников Юрий Валерьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Защита диссертации состоится «11» апреля 2019 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <http://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «__»_____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Дыбко М. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня электрический привод (ЭП) используется повсеместно во всех отраслях промышленности и в повседневной жизни людей. Электродвигателями потребляется в общей сложности более 60% всей вырабатываемой в мире электроэнергии. В диапазоне средних (до 100 кВт) и больших мощностей (свыше 100 кВт) наибольшее распространение получили асинхронные и синхронные электродвигатели переменного тока.

Большинство производственных механизмов требуют регулирования механической мощности. В системах с нерегулируемым ЭП это достигается путем изменений в самом технологическом процессе, что зачастую является неэффективным. Применение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) позволяет сократить энергопотребление от 10 до 60 %. Реализация ЧРЭП на сегодняшний день рациональна при помощи преобразователей частоты (ПЧ). Большой вклад в развитие теории управления ЧРЭП внесли ученые И. Я. Браславский, А. Б. Виноградов, А. Г. Гарганеев, В. И. Ключев, В.В. Панкратов, Г. Г. Соколовский, F. Blaschke, J. Holtz и др.

Особого внимания заслуживают ЧРЭП, работающие на автономных и ответственных объектах, аварийный останов которых может привести к выходу из строя оборудования, к значительным экономическим убыткам или даже к техногенной катастрофе. Наиболее распространенная причина аварийных остановов ЧРЭП – это сбой в питающей сети переменного тока.

В связи с этим, весьма актуальным становится вопрос по разработке ЧРЭП устойчивых к кратковременным и длительным сбоям питающей сети. Решение проблем кратковременных сбоев электропитания длительностью от 10 мс до 10 с частично можно решить алгоритмическими методами. Устойчивость ЧРЭП к сбоям электропитания длительностью более 10 с в малоинерционных механизмах возможно обеспечить только с помощью резервного источника энергии, в роли которого может выступать резервная сеть постоянного тока или аккумуляторная батарея. Непосредственное подключение аккумуляторной батареи к звену постоянного тока ПЧ зачастую невозможно, ввиду ее низкого напряжения, которое в ходе работы сильно варьируется, более чем на 50 %.

Для стабилизации напряжения звена постоянного тока ПЧ при питании от резервной сети (аккумуляторной батареи) рациональным выглядит использование преобразователей постоянного тока в постоянный (ППТ), следовательно реализация функции двойного электропитания ЧРЭП. Одним из обязательных условий построения ЧРЭП двойного электропитания является необходимость в гальванической развязке основной и резервной сети. Работу двух независимых источников ЧРЭП двойного электропитания в зависимости от требований можно организовать по принципу холодного (с остановкой электродвигателя), теплого (без остановки

электродвигателя) и горячего (без потери производительности технологического процесса) резервирования с замещением.

К настоящему времени накоплен большой опыт решения вопросов расчета и практической реализации силовых полупроводниковых преобразователей, в частности ППТ и ПЧ. Важный вклад в решении общих вопросов внесли такие видные отечественные и зарубежные ученые: Г. С. Зиновьев, Е. Е. Чаплыгин, Д. И. Панфилов, Р. Т. Шрейнер, A. Nabaе, H. Akagi, D. Holmes, и др. Однако, проблематика построения ЧРЭП двойного электропитания средней мощности, работающих по принципу горячего и теплого резервирования, на текущий момент рассмотрена не в полном объеме и является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование способов реализации и алгоритмов управления частотно-регулируемыми электроприводами с функцией резервного электропитания от сети постоянного тока, пригодных для осуществления бесперебойной работы автономных и ответственных электротехнических комплексов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть основные известные способы резервирования систем ЧРЭП, а также его источников питания. Предложить структуру ЭП двойного электропитания с наименьшими массогабаритными показателями.

2. Разработать и исследовать схему построения и алгоритмы управления ЧРЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением. Характеристики разработанного ЭП должны не допускать потерю производительности технологического процесса. Время перехода с основной сети на резервную сеть и обратно не должно превышать 20 мс.

3. Разработать и исследовать схему построения и алгоритмы управления ЧРЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Характеристики разработанного ЭП должны не допускать остановку вала электродвигателя. Время перехода с основной сети на резервную сеть и обратно должно находиться в диапазоне от 20 мс до 10 с.

4. Провести анализ влияния внутренних параметров источника резервного электропитания на устойчивость системы ЭП в целом. Разработать и исследовать алгоритм текущей динамической коррекции электромеханической системы, обеспечивающий устойчивую работу ЭП во всем диапазоне нагрузок и входных напряжений резервного источника питания.

Объектом исследования являются ЧРЭП с функцией резервного электропитания от сети постоянного тока.

Предметом исследования являются алгоритмы управления ЧРЭП обеспечивающие бесперебойную работу автономных и ответственных электротехнических комплексов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы современной теории автоматического управления, положения теории ЭП, аналитические методы расчета, основанные на применении аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов осуществляется методами цифрового моделирования в пакете программ Matlab – Simulink и натурными экспериментами.

Достоверность результатов и выводов, изложенных в диссертационной работе подтверждается сходимостью характеристик ЭП, полученных с помощью аналитических расчетов и цифрового моделирования в пакете программ Matlab – Simulink с результатами натурных экспериментов.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Предложены силовые схемы ЧРЭП переменного тока с резервным электропитанием с применением промежуточных преобразователей постоянного тока в постоянный. Разработанные схемотехнические решения отличаются от известных схем резервирования значительным снижением массогабаритных показателей электромеханической системы.

2. Разработан алгоритм управления двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока в постоянный. Алгоритм отличается от известных тем, что обеспечивает переход нагрузки с основной сети на резервную и обратно за время, не превышающее одного периода питающей сети переменного тока, а также, способен скомпенсировать влияние тока подмагничивания трансформатора на выходные характеристики ППТ.

3. Разработан новый алгоритм управления ЧРЭП переменного тока, работающим в составе системы двойного электропитания с повышающим ППТ. Разработанный безударный рекуперативный алгоритм отличается от классического алгоритма векторного управления тем, что при исчезновении основной сети переменного тока целенаправленно поддерживается магнитное состояние электрической машины, совместно с принудительным переводом двигателя в генераторный режим работы. Это позволяет не допускать остановок электродвигателя при переходе с основной сети на резервную и обратно.

4. Изучена проблематика устойчивости системы управления ППТ в зависимости от внутренних параметров источника питания постоянного тока. Получены математические соотношения параметров источника питания определяющие границы устойчивости ЭП в целом. Разработан алгоритм динамической коррекции, отличающийся от известных тем, что позволяет в текущем режиме функционирования ЭП стабилизировать его работу при любых соотношениях параметров источника питания.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Предложенные технические решения построения ЭП переменного тока двойного

электропитания от сетей переменного и постоянного тока с промежуточными преобразователями позволят существенно повысить работоспособность систем, работающих на ответственных и автономных объектах. Разработка алгоритмов управления ЭП на основе принципов горячего и теплого резервирования с замещением позволяют использовать современные ПЧ на тех объектах, где необходимо обеспечить бесперебойную работу оборудования без существенной просадки производительности при переключениях источников питания.

Предлагаемые решения построения ЭП двойного электропитания разработаны с учетом минимизации массогабаритных показателей, что положительным образом влияет на внедрение данных систем в мобильные автономные комплексы. Алгоритмические решения с аппаратным дополнением в виде ППТ позволяют реализовать адаптацию уже существующих систем частотно-регулируемых ЭП, а значит позволит произвести модернизацию таких объектов с минимальными экономическими затратами.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, приняты к внедрению в преобразователях частоты двойного электропитания (от сети переменного и постоянного тока) ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск), а также используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Структуры ЧРЭП двойного электропитания от основной сети переменного и резервной сети постоянного тока, реализующие принципы горячего и теплого резервирования с замещением.
2. Структурно-параметрический синтез алгоритма управления двунаправленным гальванически развязанным ППТ. Лабораторно-исследовательский стенд для проверки результатов работы ЭП, функционирующего по принципам горячего резервирования с замещением.
3. Безударный рекуперативный алгоритм управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Способ выбора интенсивности процесса кинетического буферирования. Лабораторно-исследовательский стенд для проверки результатов работы ЭП, функционирующего по принципам теплого резервирования с замещением.
4. Алгоритм текущей динамической коррекции устойчивости системы управления ППТ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2012), г. Новосибирск, 2012 г.; 51-й международной научной студенческой конференции (МНСК-2013), г. Новосибирск, 2013 г.; Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири», г. Новосибирск, 2013 г.; Всероссийской

научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2013), г. Новосибирск, 2013 г.; девятнадцатой Всероссийской научно-технической конференции Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность, г. Томск, 2013 г.; 52-й международной научной студенческой конференции (МНСК-2014), г. Новосибирск, 2014 г.; научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2013-2014 гг.), г. Новосибирск, 2014 г.; 15 международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам (EDM 2014), Алтай, 2014 г.; IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2016), г. Пермь, 2016 г.; семнадцатой международной научно-технической конференции электроприводы переменного тока (ЭППТ-2018), г. Екатеринбург, 2018 г.; 19 международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам (EDM 2018), Алтай, 2018 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 14 печатных работ, 2 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК, 3 – в трудах научных конференций, индексируемых в наукометрических базах Web of Science, Scopus, IEEE, 9 – в материалах и трудах Всероссийских и международных научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Она содержит 133 стр. основного текста, 79 рисунков, 5 таблиц и библиографический список из 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отражено современное состояние проблемы, сформулированы цель и задачи для ее достижения, определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту, указана практическая значимость результатов работы, приведена информация по апробации работы и публикациям.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу принципов резервирования ЧРЭП. Рассмотрены основные методы резервирования, применимые для ЧРЭП, представлены решения по оптимизации работы каждой из представленных систем резервирования. Проанализированы основные методы резервирования источника электропитания ЭП, в частности ЧРЭП с питанием от двух независимых источников переменного тока, ЧРЭП с питанием от основной сети переменного тока и резервной сети постоянного тока. Предложены основные способы построения ЧРЭП двойного электропитания от сетей переменного и постоянного тока, приведен сравнительный анализ данных систем по массогабаритным показателям.

В результате сравнительного анализа разработана структура построения ЧРЭП двойного электропитания с использованием ППТ (рисунок 1), так как она имеет наименьшие массогабаритные показатели.

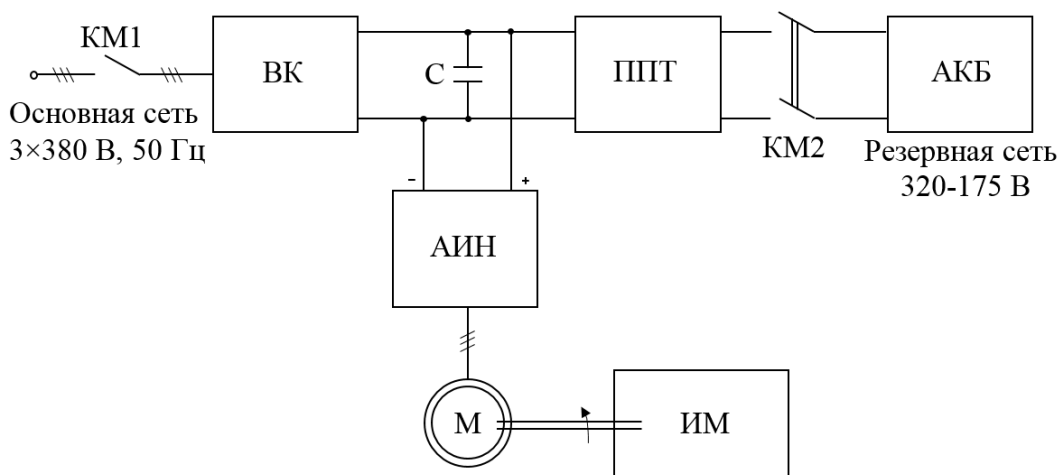


Рисунок 1 – ЧРЭП двойного питания с применением ППТ

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: КМ – электромагнитный контактор; ВК – выпрямительный комплект; С – емкостной фильтр или звено постоянного тока (ЗПТ); АКБ – аккумуляторная батарея; АИН – автономный инвертор напряжения; М – электродвигатель; ИМ – исполнительный механизм.

В качестве промежуточного устройства между звеном постоянного тока и аккумуляторной батареей используется ППТ. Основная функция ППТ заключается в стабилизации собственного выходного напряжения или напряжения звена постоянного тока ПЧ. Принципиально ППТ можно выполнить с гальванической связью или без гальванической связи основной и резервной сети.

Гальванически не развязанный повышающий ППТ наиболее целесообразно выполнить по классической схеме DC-DC step-up converter. Основным преимуществом повышающего ППТ является относительно простая силовая схема с минимальным количеством полупроводниковых приборов. В системах ЭП двойного питания с использованием повышающего ППТ, гальваническая развязка между основной и резервной сетью реализуется с помощью коммутационной аппаратуры (КМ1, КМ2). В данном случае работа системы электропитания ЭП реализована по принципу теплового резервирования с замещением, так как время переключения питания с одной сети на другую может составлять до 1,5 с.

Работу ЭП по принципу горячего резервирования с замещением можно реализовать с помощью двунаправленного гальванически развязанного ППТ (Isolated bidirectional DC-DC converter). Силовая часть гальванически развязанного ППТ имеет в своем составе высокочастотный трансформатор, который выполняет роль гальванической развязки основной сети переменного тока от резервной сети постоянного тока, тем самым исключается потребность в коммутации контакторов КМ1 и КМ2. Следовательно, время перехода с основной сети на резервную сеть и обратно может составлять менее 20 мс, что фактически обеспечит бесперебойное питание ЧРЭП. При этом, система работает без существенных потерь в производительности, а следовательно без изменения параметров технологического процесса.

Вторая глава диссертационной работы посвящена вопросам построения ЧРЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением, с применением двунаправленного гальванически развязанного ППТ.

Силовая часть двунаправленного гальванически развязанного ППТ построена на основе двух активных H-мостов, дросселя, высокочастотного повышающего трансформатора, входной и выходной емкостей (рисунок 2). Вход преобразователя подключается к источнику постоянного напряжения (U_1) или аккумуляторной батарее, выход соответственно к звену постоянного тока ПЧ (U_2).

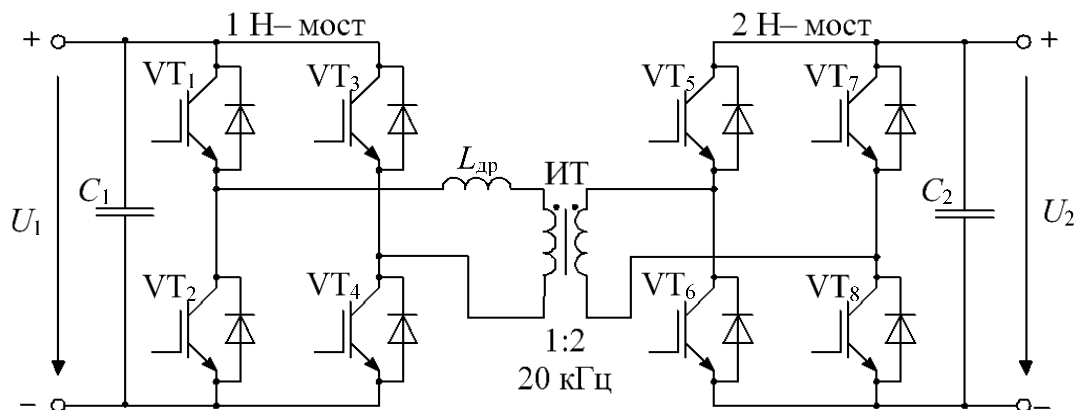


Рисунок 2 – Электрическая схема силовой части двунаправленного гальванически развязанного ППТ

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: VT – IGBT транзисторы, ИТ – высокочастотный импульсный трансформатор; C_1, C_2 – звено постоянного тока первичной и вторичной стороны ППТ соответственно; $L_{др}$ – дроссель.

Регулирование выходной мощности ППТ осуществляется изменением относительного угла сдвига входного и выходного меандра напряжений

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_1 U_2}{2\pi f_k L_{\text{тр}} k_{\text{тр}}} \left(\delta - \frac{\delta^2}{\pi} \text{sign}(\delta) \right), \quad (1)$$

где f_k – частота дискретизации ППТ; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации ИТ; δ – относительный угол сдвига первичного (U_1) и вторичного напряжения (U_2); $L_{\text{тр}} = L_{\text{се1}} + L_{\text{се2}} + L_{\text{др}}$ – приведенная индуктивность трансформатора; $L_{\text{се1}}, L_{\text{се2}}$ – индуктивность рассеяния трансформатора; $L_{\text{др}}$ – индуктивность дросселя.

В диссертационной работе построен набор регулировочных характеристик гальванически развязанного ППТ при различных входных напряжениях (U_1). Проведена их техническая линеаризация.

Структура системы управления ППТ (рисунок 3), построенная по принципу подчиненного регулирования, является системой стабилизации выходного напряжения.

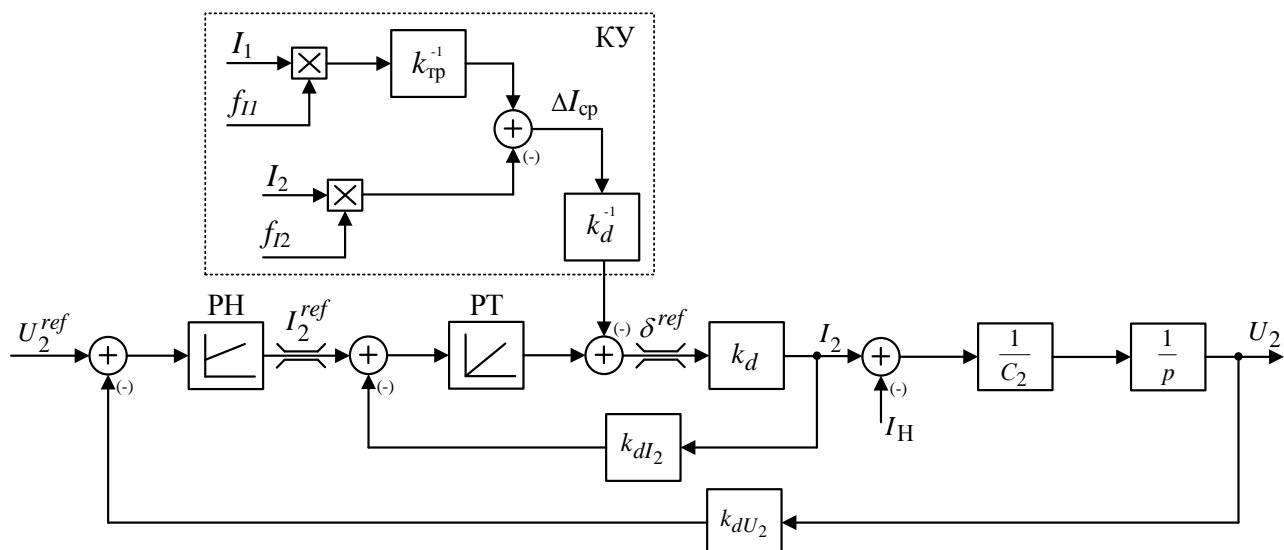


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления ППТ

На рисунке приняты следующие обозначения: РН – регулятор напряжения; РТ – регулятор тока; U_2^{ref} – сигнал задания на выходное напряжение ППТ; I_2^{ref} – сигнал задания на выходной ток ППТ; k_d – коэффициент передачи ППТ; C_2 – суммарная емкость звена постоянного тока ППТ и АИН; k_{dI_2} – коэффициент передачи обратной связи по выходному току; k_{dU_2} – коэффициент передачи обратной связи по выходному напряжению; I_H – ток нагрузки ППТ; I_2 – выходной ток ППТ; f_{I_1}, f_{I_2} – коммутационная функция первичного и вторичного тока; ΔI_{cp} – ток подмагничивания трансформатора, КУ – корректор угла.

Структурная схема системы управления ППТ состоит из двух контуров: внешний контур регулирует напряжение вторичной обмотки трансформатора; внутренний подчиненный контур регулирует вторичный ток. Для устойчивой работы системы управления в целом, собственные частоты контуров разделены согласно условию разделения движений. Для исключения влияния подмагничивания трансформатора постоянным током используется корректор относительного угла сдвига. Транзисторный преобразователь в структуре системы управления ППТ принимается безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_d , что существенно упрощает расчет параметров системы управления. Данное упрощение допустимо, так как собственная частота контура тока ППТ более чем на один порядок меньше частоты коммутации силовых транзисторов.

В качестве исполнительного двигателя, был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). Для приводов с СДПМ, как правило, используется векторное управление.

На рисунке 4 представлены переходные процессы, полученные в результате цифрового моделирования, по среднему значению тока в фазе СДПМ ($I_{дв}$), напряжению звена постоянного тока (U_{dc2}) и механической частоте вращения ротора (ω) ЧРЭП двойного электропитания. Исследовались следующие режимы работы – разгон с номинальной нагрузкой на валу, работа на номинальной скорости и номинальной нагрузкой от основной сети, переключение электропитания с основной сети на резервную, работа на номинальной скорости и номинальной нагрузкой на валу от резервной сети.

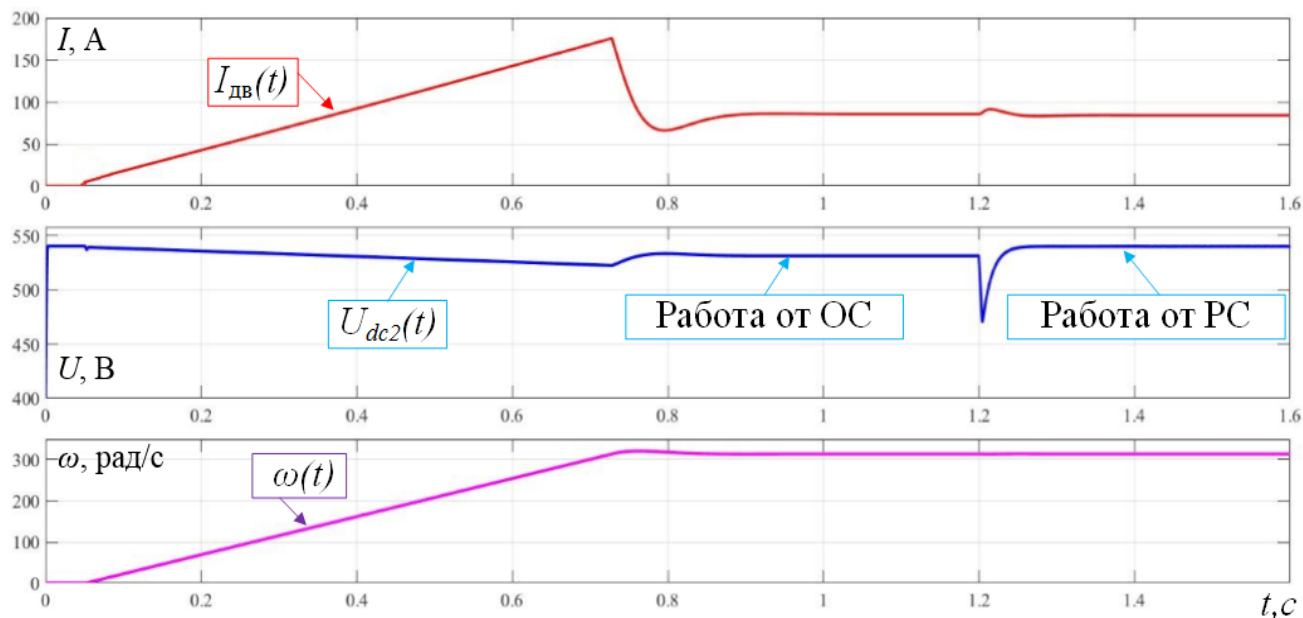


Рисунок 4 – Переходные процессы ЧРЭП двойного электропитания

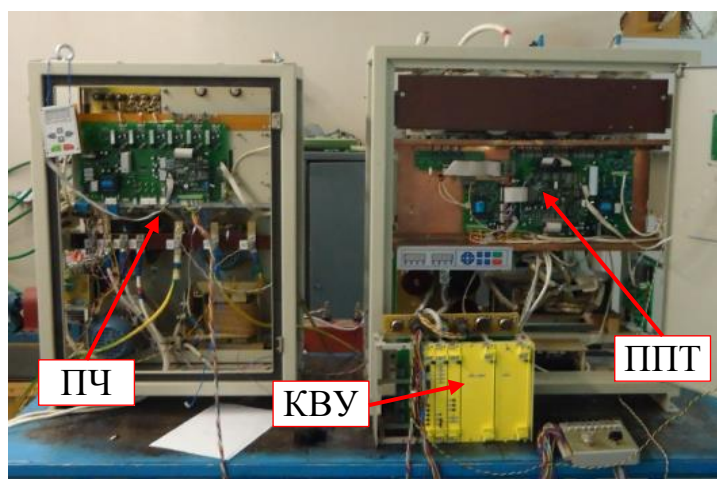


Рисунок 5 – Макетный образец ЧРЭП двойного электропитания

мкнутым ротором (55 кВт) (рисунок 5).

На рисунке 6 представлен переходный процесс выходного напряжения ППТ (U_2) в режиме переключения электропитания с основной сети на резервную, полученный в результате натурального эксперимента. На участке 1-2 ЧРЭП работает от

Экспериментальная установка ЧРЭП двойного электропитания состоит из стандартного общепромышленного двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ) мощностью 55 кВт, макета двунаправленного гальванически развязанного ППТ мощностью 60 кВт, коммутационной аппаратуры, контроллера верхнего уровня (КВУ), машинного каскада синхронного двигателя с постоянными магнитами (55 кВт) и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (55 кВт) (рисунок 5).

основной сети переменного тока. В точке 2 происходит отключение ОС. В точке 3 происходит переключение на резервную сеть постоянного тока. В точке 4 напряжение звена постоянного тока восстанавливает свое номинальное значение.

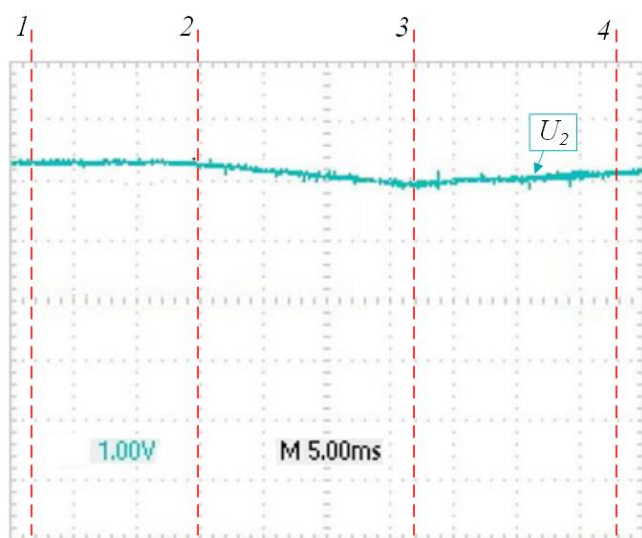


Рисунок 6 – Переходный процесс ЧРЭП двойного электропитания

стивенной потери производительности в режимах переключения источника электропитания.

Третья глава посвящена вопросам построения ЧРЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплового резервирования с замещением, с применением повышающего ППТ и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР).

Силовая схема повышающего ППТ (рисунок 7 «а») состоит из входных и выходных емкостей, дросселя, IGBT – транзистора и диода. На рисунке 7 «б» представлен макетный образец повышающего ППТ мощностью 40 кВт.

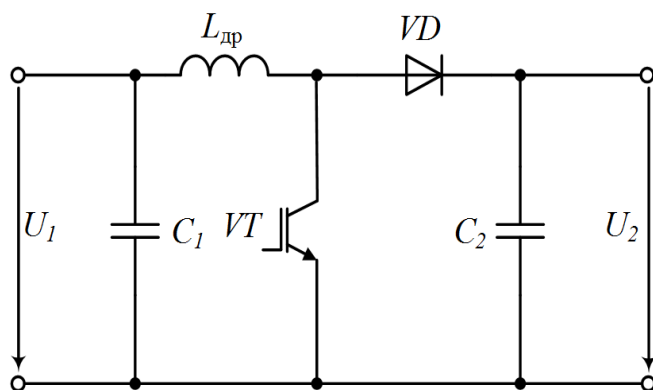


Рисунок 7 «а» – Электрическая схема силовой части повышающего ППТ

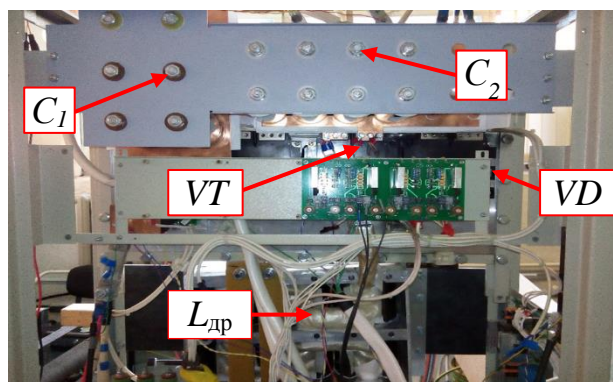


Рисунок 7 «б» – Макетный образец повышающего ППТ

Регулировочная характеристика выходной мощности без учета влияния «мертвого времени», активного сопротивления дросселя, а также падений напряжения на полупроводниковых приборах повышающего ППТ

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_1^2 U_2}{2(U_2 - U_1) f_k L_{\text{др}}} \gamma^2, \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{t_1}{T}$ – скважность управляющих импульсов, T – период ШИМ.

В диссертационной работе построен набор регулировочных характеристик повышающего ППТ при различных входных напряжениях (U_1). Проведена их техническая линейаризация.

Структурная схема системы управления повышающим ППТ (строится по аналогии с системой управления гальванически развязанного ППТ) состоит из внешнего контура напряжения и внутреннего подчиненного контура тока (см. рисунок 3).

При использовании повышающего ППТ гальваническая развязка обеспечивается коммутационной аппаратурой или контакторами (КМ1, КМ2) (рисунок 1), которые работают попеременно и с задержкой по времени (от 0,5 с до 3 с.) на включение. Алгоритмы управления стандартного ЧРЭП не подразумевают работы в режимах с кратковременными пропажами питающей сети. Исчезновение напряжения более чем на 20 мс приведет к аварийному режиму работы ПЧ и вынужденной остановке АДКЗР, что соответствует принципу холодного резервирования с замещением. Для реализации работы ЧРЭП двойного электропитания по принципу теплового резервирования с замещением предлагается использовать безударный рекуперативный алгоритм.

За основу принципов работы безударного рекуперативного алгоритма был принят алгоритм векторного управления АДКЗР. Согласно принципам векторного управления, АДКЗР представляется как двухканальный объект управления: ток по оси d (i_{sd}) формирует магнитное состояние электродвигателя, а ток по оси q (i_{sq}) является моментобразующим.

Время переходных процессов разряда ЗПТ под нагрузкой и время останова электродвигателя вращающимися инерционными массами отличаются на два и более порядка в зависимости от параметров электромеханической системы. Основная идея повышения длительности работы ЭП при исчезновении трехфазного питающего напряжения, заложенная в безударном рекуперативном алгоритме, заключается в использовании кинетического запаса энергии еще не остановившегося механизма.

На рисунке 8 представлена блок-схема разработанного безударного рекуперативного алгоритма. На рисунке 8 приняты следующие обозначения: $U_{\text{ЗПТ}}$ – напряжение звена постоянного тока; $t_{\text{Ав}}$ – время нахождения в аварийном режиме; t_{ref} – уставка времени работы алгоритма; i_q^{ref} – задание на моментобразующий ток; $U_{\text{ref}1}$ – уставка по напряжению ЗПТ для включения алгоритма управления; $U_{\text{ref}2}$ – уставка по напряжению ЗПТ для начала формирования генераторного момента; a – задание величины рекуперативного моментобразующего тока, в процентах от номинального.

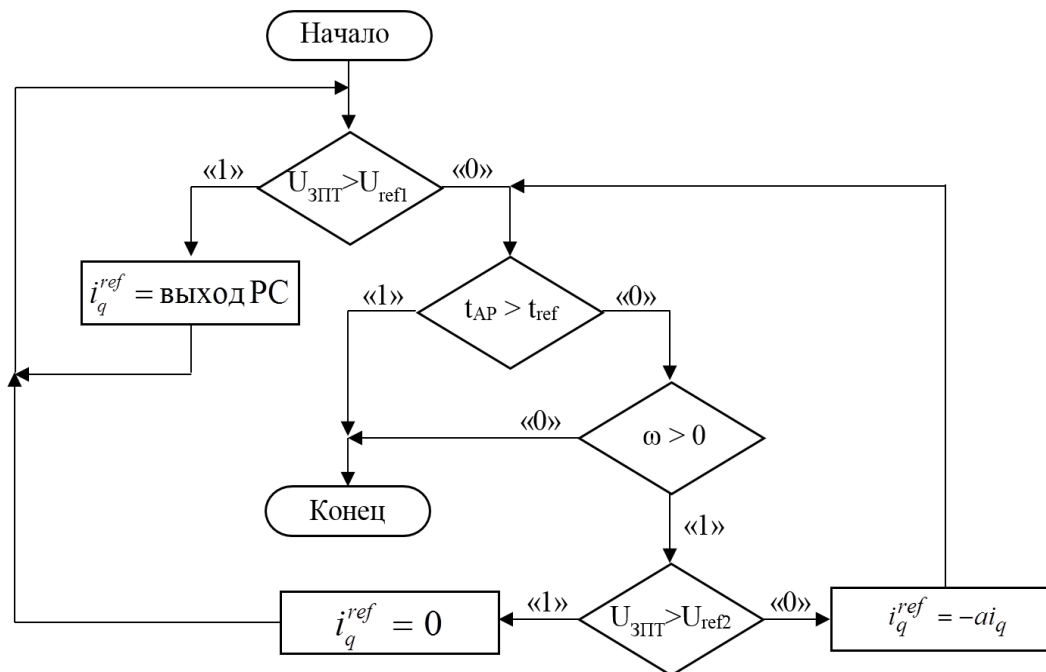


Рисунок 8 – Блок-схема безударного рекуперативного алгоритма

Если входная питающая сеть переменного тока исправна, то ЭП работает в штатном режиме, т.е. задание на регулятор тока по оси q поступает с выхода регулятора скорости. Перебои во входной питающей сети, в первую очередь, приводят к просадке напряжения ЗПТ, но как только величина напряжения становится ниже уставки U_{ref1} срабатывает аварийный режим (режим «бестоковой паузы»). Регулятор скорости размыкается, задание на моментобразующий ток поддерживается равным нулю. При этом магнитное состояние машины не изменяется, поскольку регулятор модуля вектора потокоцеплений ротора работает в штатном (до аварийном) режиме.

Величина потребляемой мощности в аварийном режиме на порядок меньше значения мощности в штатном режиме работы ЭП, за счет чего увеличивается время разряда ЗПТ и соответственно время нахождения ПЧ в работоспособном состоянии при пропаже входной питающей сети.

Если скорость перемещения механизма не равна нулю, т.е. механизм еще имеет кинетический запас энергии, и напряжение ЗПТ преобразователя опустилось ниже предельного уровня (U_{ref2}), задается отрицательный ток по оси q (генераторный момент) в процентах от номинального значения. Алгоритм управления позволяет преобразовывать кинетическую энергию механизма в электрическую, тем самым поддерживая уровень напряжения ЗПТ в пределах допустимого значения.

Ключевым моментом работы безударного рекуперативного алгоритма является то, что электрическая машина не изменяет своего магнитного состояния и тем

самым всегда известна ее текущая частота вращения. Время восстановления текущей заданной скорости после выключения аварийного режима зависит только от перегрузочной способности ПЧ и инерционности механизма.

На рисунке 9 представлены переходные процессы напряжения ЗПТ и механической частоты вращения ротора АДКЗР (4А225М4У3) в режиме переключения источника электропитания.

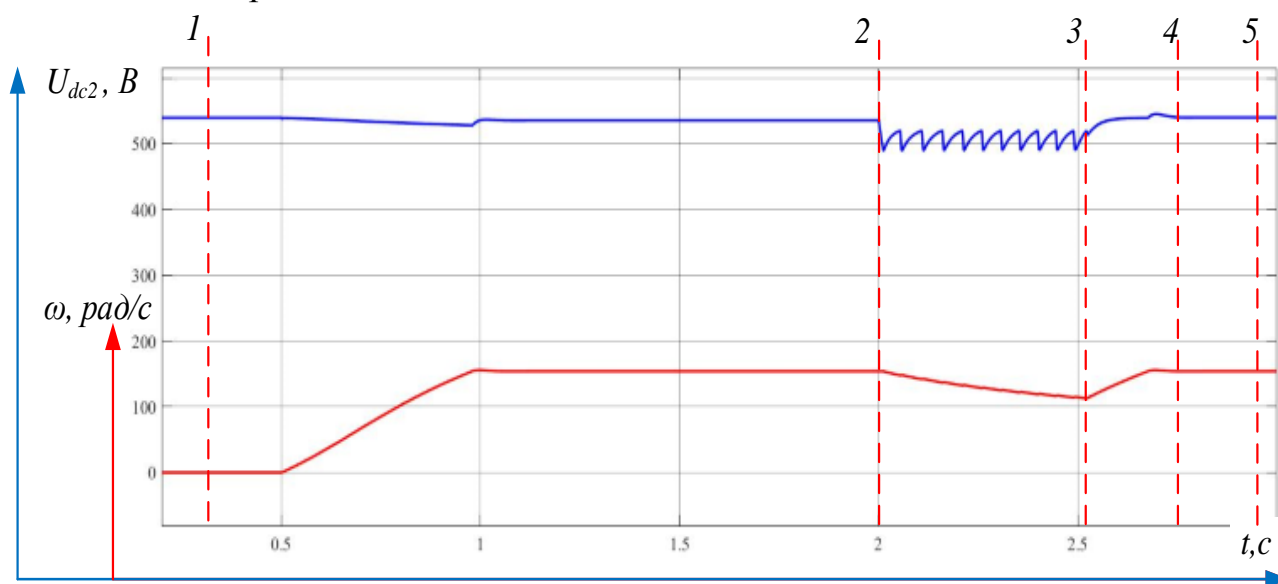


Рисунок 9 – Переходные процессы по напряжению ЗПТ ПЧ и механической частоте вращения ротора АДКЗР

ЧРЭП двойного электропитания обрабатывает следующие режимы:

- Участок 1-2. Разгон АДКЗР до номинальной скорости с номинальной нагрузкой «вентиляторного» типа при питании от основной сети. Повышающий ППТ находится в режиме готовности. Контактёр КМ1 – включен, КМ2 – выключен (рисунок 1).

- Участок 2-3. Отключение основной сети (КМ1, КМ2 – выключены). Электропривод двойного электропитания работает в аварийном режиме, согласно логике безударного рекуперативного алгоритма, который поддерживает напряжение в звене постоянного тока ПЧ на работоспособном значении.

- Участок 3-4. Переход на резервную сеть (КМ1 – выключен, КМ2 – включён). Повышающий ППТ стабилизирует ЗПТ ПЧ от резервного источника.

- Участок 4-5. АДКЗР работает в номинальном режиме работы от резервного источника.

Работа основной и резервной сети организована согласно принципам теплового резервирования с замещением. Время полного восстановления работоспособности электропривода (временной интервал 2-4) составляет – 0,75 с, динамическая просадка скорости – 27 %.

Переходные процессы при исследовании ЧРЭП двойного электропитания и повышающего ППТ полученные в результате натурного эксперимента подтверждают результаты цифрового моделирования.

Четвертая глава посвящена отдельным вопросам построения ЭП переменного тока двойного электропитания. В частности, проведено исследование устойчивости ППТ при различных внутренних параметрах источника питания постоянного тока.

Резервная электросеть постоянного тока может быть реализована с помощью блоков аккумуляторных батарей или при помощи электромшины постоянного тока, работающей в генераторном режиме. При этом, аккумуляторные батареи имеют относительно малое активное и индуктивное сопротивление в отличие от удаленного на значительное расстояние генератора постоянного тока. Параметрические изменения в системе при питании от различных типов источников постоянного тока (ИПТ) влияют на устойчивость ЭП в целом.

На рисунке 10 представлена упрощенная силовая схема ЧРЭП при питании от сети постоянного тока (или ИПТ).

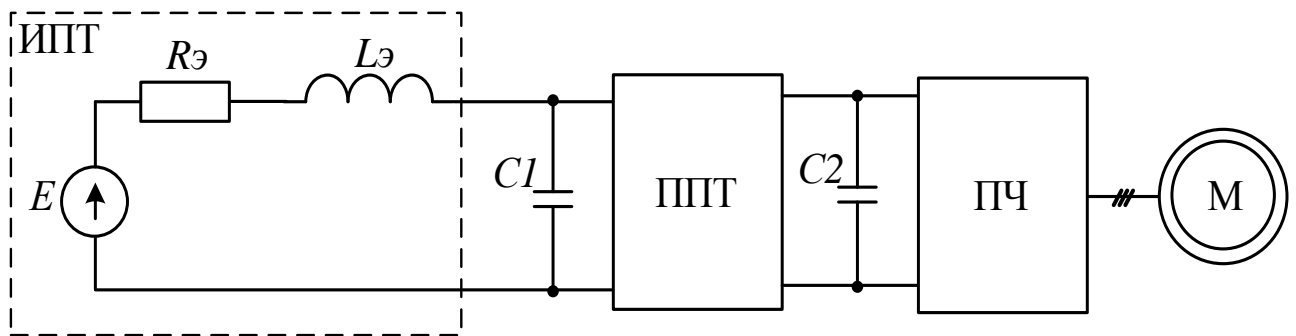


Рисунок 10 – Упрощенная силовая схема ЧРЭП двойного электропитания

Характеристический полином линеаризованной силовой схемы ЧРЭП при питании от сети постоянного тока в частотной форме записи

$$D(j\omega) = -L_э R_0 C_1 \omega^2 - (L_э - R_0 R_э C_1) j\omega - (R_э - R_0), \quad (3)$$

где $L_э$ – эквивалентная индуктивность источника; $R_э$ – эквивалентное активное сопротивление источника, которое включает: сопротивление якоря, добавочных полюсов и кабеля; C_1 – емкость входного звена ППТ по первичной стороне;

$R_0 = -\frac{U_{dc0}}{I_{l0}}$ – эквивалентное сопротивление преобразователя; U_{dc0} – напряжение первичного звена постоянного тока в точке линеаризации; I_{l0} – ток нагрузки в точке линеаризации.

В зависимости от напряжения входной емкости (C_1) ППТ и мощности в точке линеаризации, возможно три случая: а) система является устойчивой; б) система находится на границе колебательной устойчивости; в) система является неустойчивой.

$$а) R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} > \frac{L_э}{R_э C_1}, \quad б) R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} = \frac{L_э}{R_э C_1}, \quad в) R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} < \frac{L_э}{R_э C_1}, \quad (4)$$

где $P_l = P_{l0} = U_{dc0} I_{dc0}$ – мощность, отдаваемая ППТ автономному инвертору напряжения, считается постоянной, так как ППТ работает в режиме стабилизации мощности.

Устойчивая работа ЧРЭП двойного электропитания во всем диапазоне напряжений ИПТ возможна со снижением выходной мощности и соответственно нагрузки электродвигателя, что не всегда допустимо в рамках технологического процесса. Устойчивую работу ЧРЭП двойного электропитания и исключения возникновения колебательных процессов системы управления ППТ можно обеспечить, как с помощью параметрического изменения системы (подбор параметров C_1, R_3, L_3), так и алгоритмическими методами (алгоритм динамической коррекции).

Для обеспечения устойчивой работы системы управления ППТ, предлагается ввести «добавку» к мощности ΔP , которая была получена в результате синтеза

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (5)$$

где $\Delta P = \frac{L_3}{R_3} \frac{dU_{dc}}{dt} \frac{P_0}{U_{dc}}$.

На рисунке 11 представлены переходные процессы по механической частоте вращения электродвигателя и напряжению звеньев постоянного тока ППТ.

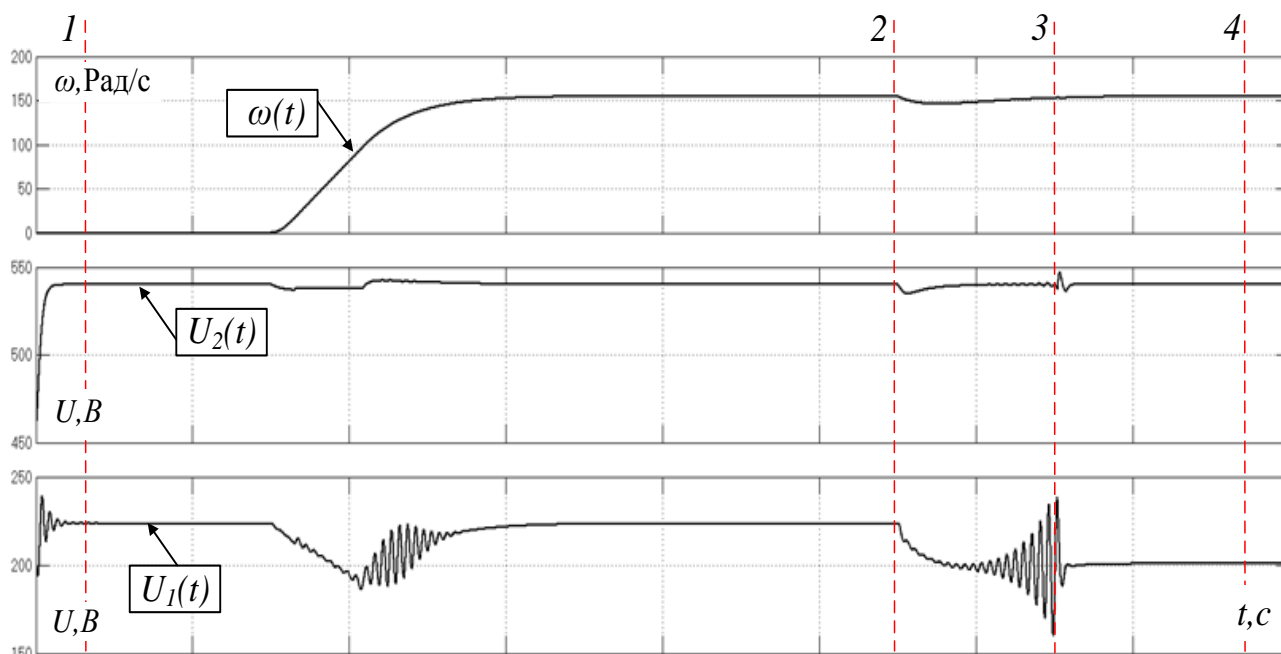


Рисунок 11 – Переходные процессы ЧРЭП в системе двойного электропитания с алгоритмом динамической коррекции

ЧРЭП двойного электропитания работает в следующем режиме: участок 1-2 предварительное намагничивание и разгон электродвигателя до номинальной скорости без нагрузки; участок 2-3 ступенчатый наброс номинальной нагрузки (неустойчивая работа); участок 3-4 включение режима динамической коррекции (устойчивая работа).

Алгоритм динамической коррекции обеспечивает устойчивую работу ЧРЭП вне зависимости от внутренних параметров и уровня напряжения резервной сети постоянного тока.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определены основные способы резервирования, применимые для ЧРЭП переменного тока и систем резервного питания. Выбраны наиболее рациональные схемы построения ЭП переменного тока по критерию минимума массогабаритных показателей, работающего согласно принципам горячего и теплого резервирования источника питания с замещением. Принятые схемотехнические решения, с использованием промежуточных преобразователей постоянного тока в постоянный, позволяют существенно снизить массогабаритные показатели при неизменности эквивалентной мощности электроустановки.

2. Разработана и исследована схема построения ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением. Представлено математическое описание и синтез системы управления двунаправленным гальванически развязанным ППТ. Разработан и исследован, как на цифровых моделях, так и в составе испытательного стенда, алгоритм управления источниками питания ЭП, обеспечивающий работу системы без существенной просадки по производительности при переключениях с основной сети на резервную и обратно. Время переключения электропитания, а также время восстановления напряжения звена постоянного тока менее одного периода питающей сети переменного тока (20 мс), что не приводит к потере производительности технологического процесса (просадка по частоте вращения вала электрической машины менее 1 %).

3. Разработана и исследована схема построения ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Представлено математическое описание и синтез системы управления повышающего ППТ. Разработан и исследован, как на цифровых моделях, так и в составе испытательного стенда, безударный рекуперативный алгоритм, обеспечивающий работу ЭП двойного электропитания при переключениях с основной сети на резервную и обратно. Время полного восстановления работоспособности электропривода при «вентиляторном» характере нагрузки составляет менее одной секунды (0,75 с), что не приводит к полной остановке технологического процесса (динамическая просадка по частоте вращения вала электрической машины – 27 %). Время полного восстановления работоспособности ЭП при «активном» характере нагрузки составляет менее двух секунд (1,6 с), что также не приводит к полной остановке технологического процесса (динамическая просадка по частоте вращения вала электрической машины – 72 %).

4. Рассмотрена проблематика устойчивости преобразователя ППТ при вариациях внутренних параметров резервной сети. Разработан и исследован способ синтеза звеньев динамической коррекции системы управления ППТ, обеспечивающий устойчивую работу, а также требуемые показатели качества переходных про-

цессов ЭП независимо от параметров источников питания резервной сети. Устойчивая работа достигается во всем диапазоне нагрузок и входных напряжений резервного источника питания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вислогузов Д.П. Алгоритмы управления и обеспечение устойчивости системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода от сети постоянного тока / В.В. Вдовин, Д.П. Вислогузов, В.А. Клан, Д.А. Котин, В.В. Панкратов, А.В. Сметанников // Электротехника. – 2015. – №8. – С. 54-58.

2. Вислогузов Д.П. Синтез системы управления импульсным преобразователем постоянного тока в составе электропривода переменного тока/ Д.П. Вислогузов, Д.А. Котин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – №3. – С. 53-58.

Статьи в журналах и материалы конференций, входящих в международные базы SCOPUS, Web of Science

3. Denis P. Visloguzov. DC Mains Backup Power System for Frequency-Controlled Electric Drive / Denis P. Visloguzov, Vladimir V. Vdovin, Victor A. Klan, Denis A. Kotin, Vladimir V. Pankratov, Andrey V. Smetannikov // 15 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU. – 2014. – P. 387-391.

4. Vislogusov D.P. Bidirectional DC-DC conversion device use at system of urban electric transport / M.E. Vilberger, D.P. Vislogusov, D.A. Kotin, A.V. Kulekina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Art. 032053 (6 p.).

5. Denis P. Vislogusov. Bidirectional DC-DC Conversion Device Us-age in Tram / Denis P. Vislogusov, Anna V. Kulekina // 19 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU. – 2018. – P. 659-662.

Публикации в трудах конференций

6. Вислогузов Д.П. Автоматическое управление частотно регулируемым электроприводом с резервным питанием от сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов, А.В. Сметанников // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых. –Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2012. – С. 271-272.

7. Вислогузов Д.П. Автоматическое управление частотно регулируемым электроприводом с резервным питанием от сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов, А.В. Сметанников // Материалы 51-й международной научной студенческой конференции МНСК-2013: Транспорт. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т. – 2013. – С.13.

8. Вислогузов Д.П. Стабилизация системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода при изменениях напряжения сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов, А.В. Сметанников // Сборник тезисов докладов Новосибирской

межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири». – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2013. – С. 28.

9. Вислогузов Д.П. Разработка системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода от сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов, В.В. Панкратов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2013. – С. 61-62.

10. Вислогузов Д.П. Система резервного питания частотно-регулируемого электропривода для ответственных автономных объектов / Д.П. Вислогузов, А.В. Сметанников, В.В. Панкратов // Энергетика: Эффективность, Надежность, Безопасность: материалы трудов девятнадцатой всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ООО «Скан». – 2013. – С. 50-53.

11. Вислогузов Д.П. Разработка системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода от сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов, В.В. Вдовин // Материалы 52-й международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Мехатроника и автоматизация. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т. – 2014. – С.22.

12. Вислогузов Д.П. Создание системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода от сети постоянного тока / Д.П. Вислогузов // Материалы научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2013-2014 гг.). – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2014. – С. 24.

13. Вислогузов Д.П. Алгоритм работы электропривода переменного тока в условиях кратковременной пропажи питающей сети / Вислогузов Д.П., Котин Д.А., Волков В.Ю. // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2016. – С. 16-19.

14. Вислогузов Д.П. Специализированные функции многоуровневых преобразователей частоты «ЭРАТОН-В» с каскадным включением H-мостов = The special functionalities of the multilevel cascaded H-bridge frequency converters "ERATON-V" / О. В. Нос, Е. С. Кучер, Д. П. Вислогузов [и др.] // Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2018): 3-я международная. 17 научно-техническая конференция. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина». – 2018. С.49-52.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60x84x1/16. Тираж 100 экз. Печ. л. 1.25.

Заказ № 408 Подписано в печать «04» февраля 2019 г.