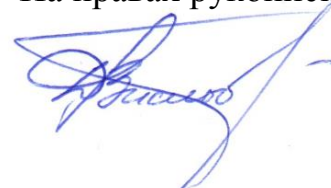


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Котин Денис Алексеевич

Новосибирск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	17
1.1 Основные принципы и определения систем резервирования электроприводов.....	17
1.1.1 Классификация принципов резервирования электропривода	17
1.1.2 Принцип резервирования частотно-регулируемого электропривода дублированием	18
1.1.3 Мажоритарные системы резервирования электропривода переменного тока.....	22
1.2 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника питания.....	25
1.2.1 Виды резервных источников питания для электропривода переменного тока	25
1.2.2 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника переменного тока	26
1.3 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника постоянного тока. Электропривод двойного электропитания.....	28
1.3.1 Системы электропривода двойного электропитания на автономных объектах	28
1.3.2 Электропривод двойного электропитания с двумя электродвигателями	29
1.3.3 Трехфазный гальванически развязанный преобразователь для систем электропривода двойного питания.....	31
1.3.4 Преобразователи постоянного тока в постоянный для электропривода двойного питания	33
1.3.5 Массогабаритные показатели частотно-регулируемых электроприводов двойного питания.....	35

Выводы по главе.....	37
ГЛАВА 2 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ.....	38
2.1 Силовая схема и принцип работы гальванически развязанного двунаправленного преобразователя постоянного тока в постоянный	38
2.2 Синтез и исследование системы управления двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока.....	44
2.3 Алгоритм работы частотно-регулируемого электропривода двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением.....	51
2.4 Экспериментальные исследования электропривода двойного электропитания с двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока в постоянный и приводным синхронным двигателем с постоянными магнитами	57
Выводы по главе.....	64
ГЛАВА 3 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ.....	66
3.1 Силовая схема и принцип работы повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный	66
3.2 Алгоритмы работы асинхронного электропривода от преобразователя частоты с двойным электропитанием	73
3.3 Экспериментальное исследования электропривода двойного электропитания с повышающим преобразователем постоянного тока в постоянный и приводным асинхронным электродвигателем.....	83
Выводы по главе.....	88
ГЛАВА 4 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ФУНКЦИЕЙ ПИТАНИЯ ОТ РЕЗЕРВНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	90

4.1 Анализ устойчивости преобразователя постоянного тока при питании от источника ограниченной мощности.....	90
4.2 Высоковольтные частотно-регулируемые электроприводы переменного тока двойного электропитания	97
Выводы по главе.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А Пример расчета коэффициентов регуляторов гальванически развязанного преобразователя постоянного тока в постоянный и синхронного двигателя с постоянными магнитами	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Пример расчета коэффициентов регуляторов повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный и параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В Цифровая модель алгоритма динамической коррекции.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты внедрения научных результатов диссертации.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня электрический привод (ЭП) используется повсеместно во всех отраслях промышленности и повседневной жизни людей. Электродвигателями потребляется в общей сложности более 60% всей вырабатываемой в мире электроэнергии, которая, большей частью, генерируется на ТЭЦ, ГЭС и АЭС. На данный момент существует более миллиона различных по исполнению и мощности электродвигателей, которые используются при построении систем вентиляции, насосных станций, компрессорных установок, конвейеров, обрабатывающих станков, робототехники, автомобилей, городского транспорта, бытовых приборов и т.д.

В диапазоне средних (до 100 кВт) и больших мощностей (свыше 100 кВт) наибольшее распространение получили электродвигатели переменного тока, в частности асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АДКЗР) и синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ). При этом, АДКЗР является самой доступной по стоимости и простой в исполнении электрической машиной, а значит и самой распространенной в современной промышленности. АДКЗР может работать напрямую от питающей сети без промежуточных силовых преобразователей и используется в системах как с нерегулируемым, так с регулируемым ЭП. СДПМ имеет высокие удельные энергетические показатели, благодаря этому применяется в специализированном ЭП. Несмотря на относительно высокую стоимость, СДПМ имеет ряд преимуществ: минимальные массогабаритные показатели при равных эквивалентных мощностях, высокий КПД из-за отсутствия потерь в роторе, гарантированное наличие номинального магнитного потока за счет применения постоянных магнитов и др. Спектр мощностей электродвигателей переменного тока от 100 Вт до 12 МВт охватывает весь перечень производственных механизмов [1].

Большинство производственных механизмов требуют регулирования механической мощности, что в системах с нерегулируемым ЭП достигается путем

изменений в самом технологическом процессе. К примеру, на вентиляторах, компрессорах и насосах для регулировки производительности используют различные заслонки и дроссели, на конвейерах, металло и деревообрабатывающих станках применяют различные коробки передач и вариаторы. Однако, такие методы регулирования производительности технологических процессов зачастую являются неэффективными. Применение регулируемого ЭП позволяет сократить энергопотребление от 10 до 60 %. Реализация регулируемого ЭП переменного тока на сегодняшний день рациональна при помощи преобразователей частоты (ПЧ) [2]. Развитие частотно-регулируемого ЭП переменного тока стало возможным благодаря совершенствованию соответствующей элементной базы: силовой полупроводниковой техники, микропроцессорной техники и микроэлектроники, а также становлению теоретических основ – теории векторного управления электроприводами переменного тока, теории автоматического управления многосвязными нелинейными объектами. Большой вклад в развитие теории управления электродвигателями переменного тока 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. Для управления низковольтными машинами с напряжением от 220 В до 1140 В чаще всего используются двухзвенные ПЧ, силовая часть которых состоит из выпрямительного комплекта, звена постоянного тока и автономного инвертора напряжения. Для управления высоковольтными машинами с напряжением 3-10 кВ наибольшее распространение получили ПЧ, выполненные по схеме многоуровневого инвертора напряжения из последовательно соединенных силовых ячеек [6]. К дополнительным преимуществам использования ПЧ можно отнести: ограничение пусковых токов, защита от перегрузки двигателя, ограничение динамических усилий механических узлов, возможность работать выше номинальной скорости электродвигателя, возможность глубокой автоматизации технологического процесса и т.д.

Несмотря на всемирную электрификацию, существует множество автономных электротехнических комплексов, к которым относятся удаленные объекты крайнего севера или малонаселенных регионов, морские суда,

передвижные комплексы, электротранспорт и иные электротехнические системы с собственной генерацией. К тому же, становятся все более популярны системы с электропитанием от альтернативных или возобновляемых источников энергии, к которым относятся ветроэнергетика, гелиоэнергетика, альтернативная гидроэнергетика, геотермальная энергетика и др. [7]. Как правило, мощность подобных источников варьируется, исходя из текущего времени суток, направления и скорости ветра или времени года. Решение данной проблемы возможно благодаря накопителям, которые позволяют аккумулировать выработанную электроэнергию альтернативного источника в пике его интенсивности с ее дальнейшим потреблением нагрузкой по мере необходимости, к которым относятся гидроаккумуляторы, маховики, пружинные и пневматические системы накопления энергии. Однако, наиболее популярный накопитель энергии сегодня – это аккумуляторные батареи (свинцовые, литий-ионные, цинковые и др.), конденсаторные и суперконденсаторные установки (электролитические, пленочные, ионисторы и др.) [8; 9].

Особого внимания заслуживают ЭП, работающие на ответственных объектах, аварийный останов которых может повлечь выход из строя оборудования, значительным экономическим убыткам из-за нарушения технологического процесса или даже к техногенной катастрофе. К примеру, аварийный останов ЭП насоса масло-подшипника турбогенератора или газоперекачивающей установки может привести к его полному разрушению и соответственно к простоя оборудования и многодневным ремонтным работам по замене. Или, при транспортировке и перемешивании жидких металлов или полимерных материалов, даже останов на 10 с производственной линии, может спровоцировать затвердевание сырья и как следствие, большие трудозатраты по восстановлению оборудования. Одним из распространенных решений повышения отказоустойчивости ЭП – это применение различных схем по резервированию. При этом, системы, применяемые на автономных и мобильных объектах, должны быть разработаны с учетом минимизации массогабаритных показателей.

Резервирование ЭП может быть полным (дублирование, мажоритарные системы) или частичным, которое обеспечивается по принципу замещения.

Современные технологии производства и системы управления, построенные при помощи микропроцессорной техники, позволяют изготавливать ПЧ высокого качества с минимальным процентом отказов, благодаря этому основными причинами аварийных остановов частотно-регулируемых ЭП являются человеческий фактор и сбои в электропитании. Большинство питающих электросетей имеют резервные фидеры с функцией автоматического включения, время ввода которых составляет 0,5...3 с. Однако, общепромышленные ПЧ не устойчивы даже к таким кратковременным сбоям электропитания, так при пропаже питающего напряжения ПЧ более чем на 10 мс приведет к вынужденной остановке электродвигателя. С другой стороны, существует множество алгоритмов автоматического подхвата (автоподхвата) еще не остановившегося электродвигателя, но они актуальны только для механизмов с большим моментом инерции. Время восстановления текущей заданной скорости при работе алгоритмов автоподхвата не менее 7-10 с, что зачастую является недопустимо для многих технологических процессов.

В связи с этим, весьма актуальным становится вопрос по разработке частотно-регулируемых ЭП 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, в результате этого можно с минимальными экономическими затратами модернизировать уже существующие ПЧ. Устойчивость к сбоям электропитания длительностью более 10 с в малоинерционных механизмах можно обеспечить лишь с помощью резервных источников (аккумуляторных батарей или суперконденсаторов). Очевидно, что наиболее рациональным решением является подключение аккумуляторных батарей непосредственно в звено постоянного тока ПЧ. Однако, работа общепромышленного ПЧ напрямую от аккумуляторных батарей чаще всего невозможна, ввиду их низкого напряжения. К тому же, напряжение аккумуляторных батарей в ходе работы сильно варьируется более чем

на 50 %, что является недопустимым для номинального режима работы ПЧ. Для стабилизации напряжения звена постоянного тока ПЧ при питании от резервной сети рациональным выглядит использование преобразователей постоянного тока в постоянный (ППТ).

При построении систем частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания необходимо учитывать, что основная и резервная сеть должны быть в обязательном порядке гальванически развязаны. Данное требование необходимо для сохранения максимальной работоспособности системы при авариях (например, короткое замыкание) одного из источников электропитания. Работу двух независимых источников ЭП 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, А. Nabaе, Н. Akagi, D. Holmes, и др. Однако, проблематика построения частотно-регулируемых ЭП двойного электропитания средней мощности, работающих по принципу горячего и теплого резервирования, на текущий момент рассмотрены не в полном объеме.

В соответствии с указанными проблемами были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование способов реализации и алгоритмов управления частотно-регулируемыми ЭП 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 должны быть решены следующие **задачи**.

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

2. Разработать и исследовать схему построения и алгоритмы управления частотно-регулируемым ЭП 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 частотно-регулируемым ЭП 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 частотно-регулируемые ЭП с функцией резервного электропитания от сети постоянного тока.

Предметом исследования являются алгоритмы управления частотно-регулируемыми ЭП обеспечивающие бесперебойную работу автономных и ответственных электротехнических комплексов.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложены силовые схемы частотно-регулируемого ЭП 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 частотно-регулируемым ЭП 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 состоит в следующем.

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 позволят реализовать адаптацию уже существующих систем частотно-регулируемых ЭП, а значит позволит произвести модернизацию таких объектов с минимальными экономическими затратами.

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.

На защиту выносятся следующие основные результаты.

1. Структуры частотно-регулируемого ЭП 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.

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) (Приложение Г).

Степень достоверности работы.

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

Апробация работы.

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

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

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач исследования, выполнение расчетов, разработка методик структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления, исследование синтезированных алгоритмов методом численного моделирования, проведение натуральных экспериментов, анализ 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 133 стр. основного текста, 79 рисунков, 5 таблиц и библиографический список из 68 наименований.

Первая глава диссертационной работы посвящена принципам резервирования частотно-регулируемых ЭП. Рассмотрены основные методы

резервирования применимые для частотно-регулируемых ЭП, представлены решения по оптимизации работы каждой из представленных систем резервирования. Рассмотрены основные методы резервирования источника электропитания ЭП, в частности частотно-регулируемый ЭП с питанием от двух независимых источников переменного тока, частотно-регулируемый ЭП с питанием от основной сети переменного тока и резервной сети постоянного тока. Предложены основные решения по построению частотно-регулируемых ЭП двойного электропитания от сетей переменного и постоянного тока, приведен сравнительный анализ данных систем.

Вторая глава посвящена вопросам построения частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением. Представлено математическое описание и методика синтеза системы управления повышающего гальванически развязанного ППТ. Разработан и исследован алгоритм работы ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением. Представленный алгоритм обеспечивает работу ЭП переменного тока без потери производительности при переключениях источников электропитания. Представлены результаты цифрового моделирования и натурных экспериментов, подтверждающие научные результаты и функционирование разработанного алгоритма.

Третья глава посвящена вопросам построения частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Представлено математическое описание и методика синтеза системы управления повышающего ППТ. Разработан и исследован алгоритм работы ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Представленный безударный рекуперативный алгоритм обеспечивает работоспособность ПЧ с минимальной возможной просадкой по скорости электродвигателя в режимах переключения источников питания. Представлены результаты цифрового моделирования и

натурных экспериментов, подтверждающие научные результаты и функционирование разработанного алгоритма.

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. Разработан и исследован алгоритм динамической коррекции, обеспечивающий устойчивую работу ППТ во всем диапазоне рассматриваемых напряжений сети постоянного тока и нагрузок ЭП. Представлены результаты цифрового моделирования, подтверждающие научные результаты и функционирование разработанных алгоритмов. Рассмотрены технические решения повышения надежности при проектировании высоковольтных частотно-регулируемых ЭП двойного электропитания.

Приложения состоят из четырех разделов. Первый раздел посвящен расчетам параметров системы управления частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования. Представлен расчет параметров и номинальных данных СДПМ, необходимых для цифрового моделирования. Здесь же, приводятся структурные схемы цифровой модели ЭП двойного электропитания. Во втором разделе представлен расчет схемы замещения и номинальных данных АДКЗР, необходимых для цифрового моделирования, а также расчет параметров системы управления повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный. Здесь же, представлена цифровая модель частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. В третьем разделе приводятся цифровые модели алгоритма динамической коррекции системы управления преобразователя постоянного тока в постоянный. В четвертом разделе представлены акты внедрения, разработанных в диссертации, схемотехнических решений и алгоритмов управления.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1.1 Основные принципы и определения систем резервирования электроприводов

1.1.1 Классификация принципов резервирования электропривода

Резервирование (Redundancy) – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций [10]. Резервирование может быть общим, когда резервируется система в целом, и отдельным (поэлементным), когда резервируются отдельные элементы системы. Резервирование можно разделить по принципу действия на постоянное, с замещением и смешанное.

Постоянное резервирование (Continuous redundancy) – резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений [10]. При этом все элементы системы являются равноценными и выполняют одну функцию. Постоянное резервирование можно разделить на резервирование дублированием и мажоритарные системы (системы голосования).

Резервирование с замещением (Standby redundancy) — резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента [10]. Резервирование с замещением может быть с холодным, тёплым или горячим резервом.

Горячее резервирование с замещением (hot standby) в ЭП – резервирование при котором переход с основного элемента на резервный происходит без потери производительности ЭП[10]. Время перехода с основного элемента на резервный

или обратно для автономных ответственных объектов как правило должно находиться в диапазоне от 1 мс до 20 мс.

Теплое резервирование с замещением (warm standby) в ЭП – резервирование при котором переход с основного элемента на резервный происходит без остановки электродвигателя или остановки технологического процесса [10]. Время перехода с основного элемента на резервный или обратно для автономных ответственных объектов как правило должно находиться в диапазоне от 20 мс до 10 с.

Холодное резервирование с замещением (cold standby) в ЭП – резервирование, при котором переход с основного элемента на резервный или обратно происходит с допустимой остановкой технологического процесса [10]. Время перехода с основного элемента на резервный или обратно для рассматриваемого класса объектов управления составляет более 10 с.

Смешанное резервирование (Combined redundancy) – сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте [10].

Резервный элемент в системах резервирования замещением может быть нагруженный, облегченный и ненагруженный.

Нагруженный резерв – резервный элемент находится в таком же режиме работы, как и основной элемент.

Облегченный резерв – резервный элемент находится в менее нагруженном состоянии чем основной элемент.

Ненагруженный резерв – резервный элемент находится в выключенном состоянии до начала использования его вместо основного элемента.

1.1.2 Принцип резервирования частотно-регулируемого электропривода дублированием

Дублирование (Duplication) – резервирование с кратностью резерва один к одному. Дублирование является частным случаем резервирования кратностью, количество резервных элементов может быть больше, соответственно трехкратное,

четырёхкратное и n – кратное резервирование [12]. Функциональная схема резервирования ЭП дублированием представлена на рисунке 1.1.

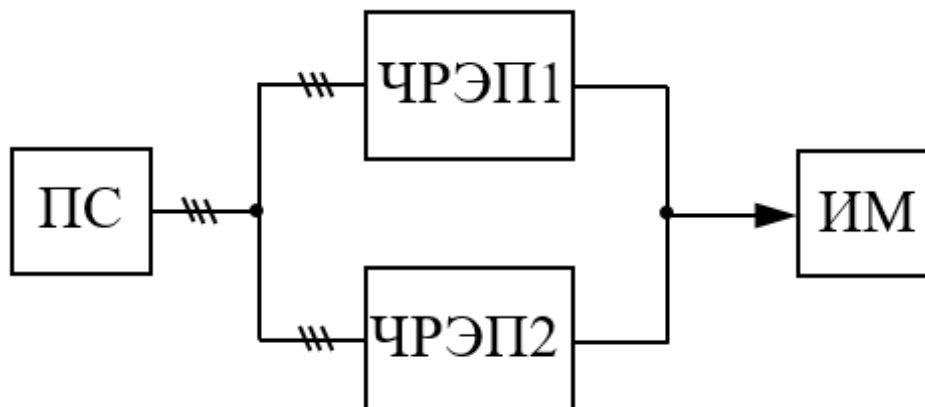


Рисунок 1.1 – Функциональная схема резервирования дублированием ЭП

На рисунке 1.1 были приняты следующие обозначения: ПС – питающая электросеть; ЧРЭП – частотно-регулируемый ЭП; ИМ – исполнительный механизм.

При дублировании ЧРЭП1 и ЧРЭП2 работают совместно, при этом нагрузка между двумя системами делится пополам. Номинальная мощность каждого ЧРЭП при дублировании выбирается на полную мощность, исходя из этого, выход одного ЭП из строя не отразится на производительности всей системы (рисунок 1.3 «а»).

Предположим, что безотказность каждого ЧРЭП в течении времени t равна $P(t) = 0,9$. Если отказы ЧРЭП1 и ЧРЭП2 не зависимы друг от друга, то вероятность отказа системы будет равна произведению вероятностей каждого ЧРЭП, согласно теории умножения вероятностей [11]

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i = \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (1.1)$$

где n – кратность резервирования.

Вероятность безотказной работы тогда равна

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (1.2)$$

Согласно выражению (1.2) надежность системы будет равна $P(t) = 0,99$.

Рассмотрим резервирование ЭП дублированием на примере насосной станции с двумя независимыми электронасосами (ЭН), работающими на общую магистраль (рисунок 1.2).

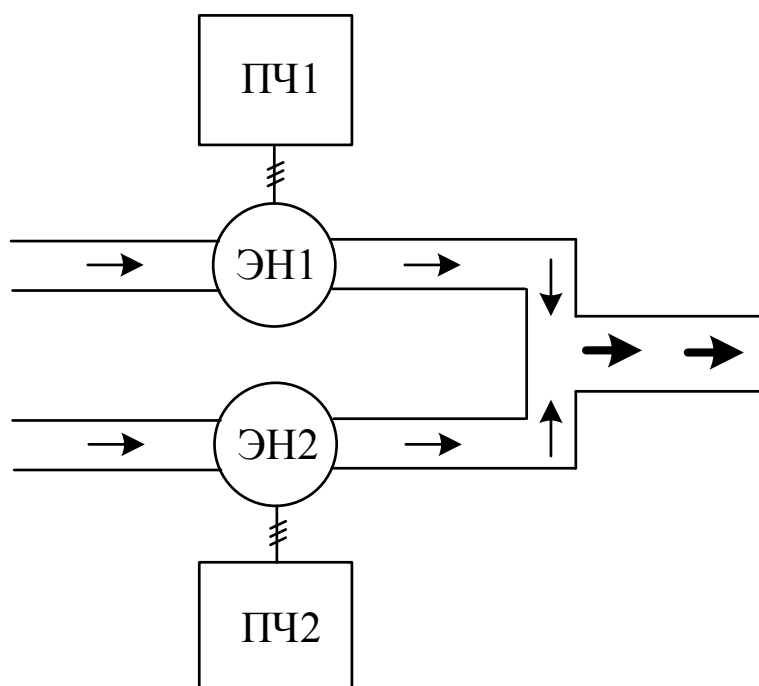


Рисунок 1.2 – Схема ЭП насосной станции

В состав ЭП включены ПЧ, которые позволяют энергоэффективно регулировать производительность насосной станции в сравнении с регулированием задвижками (дросселем) [12]. Известно, что потребляемая мощность электронасосом от ПЧ имеет кубическую характеристику в зависимости от изменения частоты вращения [13]. При дублировании каждый электронасос должен обеспечить половину производительности при этом, вал и рабочее колесо насоса будут иметь относительную частоту вращения $\omega_{1,2} = \sqrt[3]{0,5} \approx 0,8$, где 1 – это номинальная частота вращения электродвигателя. Износ фрикционных деталей, а также рабочего колеса каждого электронасоса определяется тем, находится насос в работе или нет, а также зависит от текущей частоты вращения насосных агрегатов. В нашем случае текущая скорость электронасосов снизилась всего на 20 % относительно системы с единичным электронасосом, что

соответственно сокращает гарантийный срок службы системы и как следствие ее надежность.

Данную систему дублирования можно использовать также с недогруженным резервом. При этом система управления должна быть построена таким образом, что условно первый электронасос работает практически в номинальном режиме, а второй электронасос работает на минимальных оборотах или вовсе остановлен. Если при этом, по каким-либо причинам, первая система ЧРЭП вышла из строя, то вторая мгновенно компенсирует выходную мощность, увеличивая обороты второго электронасоса, тем самым обеспечивая принцип горячего или теплого резервирования с замещением.

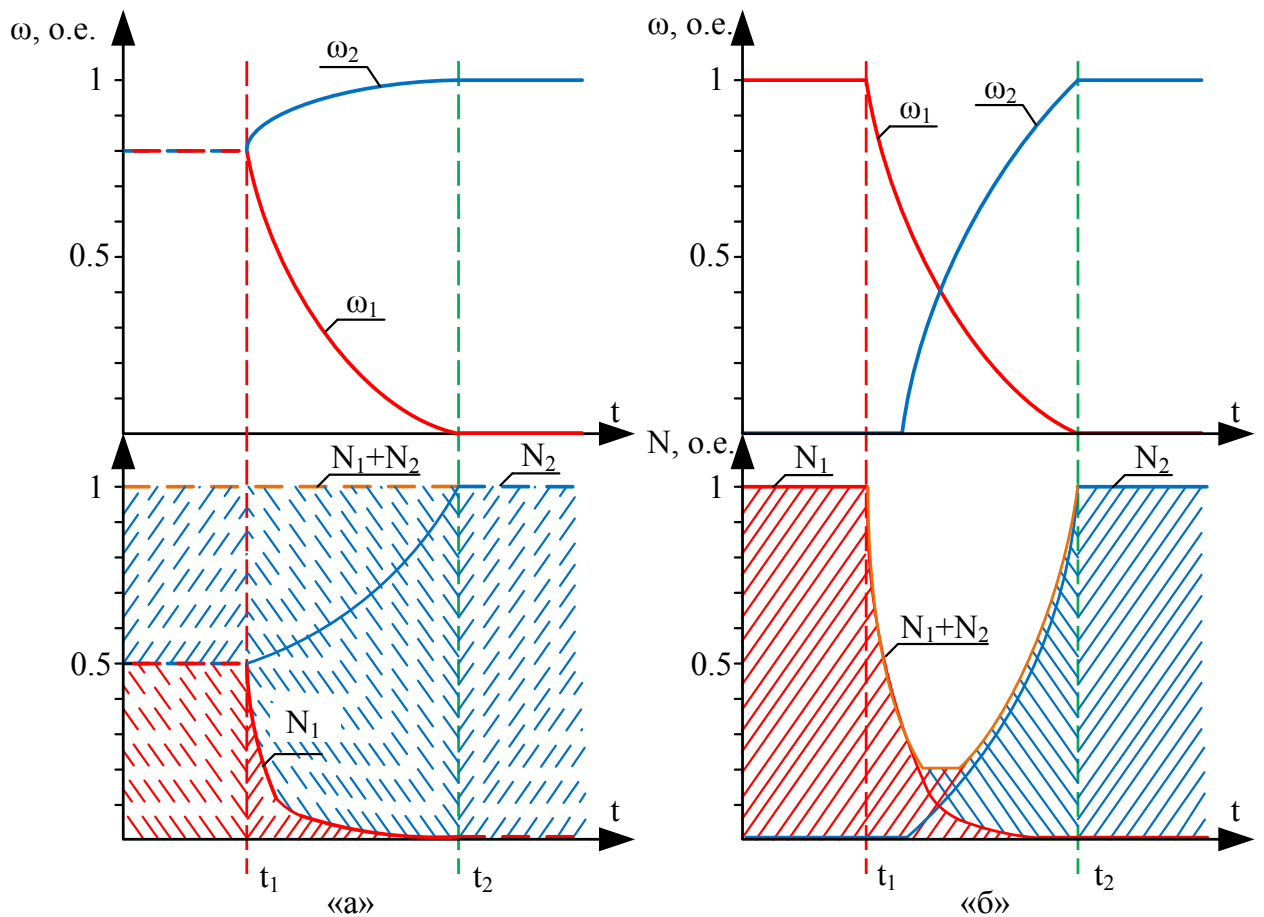


Рисунок 1.3 – Переходные процессы частоты вращения вала и производительности электронасоса при резервировании дублированием

На рисунке 1.3 были приняты следующие обозначения: ω_1, ω_2 – частота вращения первого и второго электронасоса соответственно; N_1, N_2 – производительность первого и второго электронасоса соответственно; $N_1 + N_2$ – суммарная производительность двух электронасосов; t_1 – авария первой системы ЧРЭП; t_2 – восстановление производительности системы.

Если технологический процесс позволяет кратковременное понижение производительности электронасоса или его кратковременную остановку (например, водоотведение сточных вод в шахте), то система дублирования может работать по принципу теплого или холодного замещения (рисунок 1.3 «б»). То есть, работает всегда одна система ЧРЭП, вторая находится в резерве и включается только в случаи выхода из строя первой системы. При этом, возможны перебои в производительности системы, это связано с подготовкой ПЧ2 к запуску электродвигателя (время предварительного заряда звена постоянного тока ПЧ2, намагничивание электродвигателя, разгон электродвигателя до номинальных оборотов).

1.1.3 Мажоритарные системы резервирования электропривода переменного тока

Мажоритарная система (majority voting system) (резервирование кратностью) – вариант системы с параллельным соединением, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов [11]. Функциональна схема мажоритарной системы «2 из 5» представлена на рисунке 1.4.

Каждый ЧРЭП равнозначен, поэтому система регулирования технологического процесса, в данном случае, будет работоспособна, если будут исправны любые две, три, четыре или пять систем ЧРЭП.

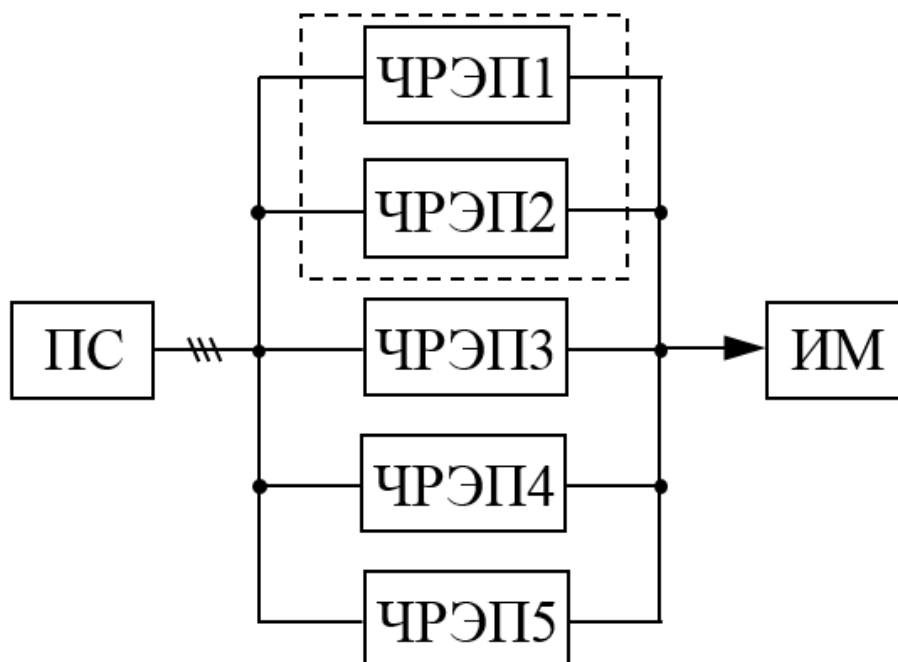


Рисунок 1.4 – Функциональная схема мажоритарной системы

Надежность такой системы можно рассчитать методом производящих функций [14]. Согласно теореме сложения вероятностей, вероятность отказа насосной станции равна сумме вероятностей всех неработоспособных состояний

$$P_c = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k P^k (1-P)^{n-k}, \quad (1.3)$$

где $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ – биномиальный коэффициент из n по k ; n – общее количество элементов системы; m – минимальное число элементов системы, при которой сохраняется работоспособность системы; k – число работоспособных элементов системы.

Исходя из выражения (1.3) вероятность работы насосной станции, построенной по мажоритарному способу резервирования «2 из 5» будет равна

$$P_c = C_5^2 P^2 (1-P)^3 + C_5^3 P^3 (1-P)^2 + C_5^4 P^4 (1-P) + C_5^5 P^5$$

или

$$P_c = 10P^2 - 20P^3 + 15P^4 - 4P^5. \quad (1.4)$$

Если принять надежность одного ЧРЭП $P = 0,9$, то надежность системы согласно выражению (1.4) будет равно $P_c = 0,99955$.

Удачным решением использования мажоритарной системы резервирования, является пример многодвигательного ЭП передвижения козлового крана. Передвижение крана возможно если будут работоспособны любые «2 из 5» ЧРЭП, при этом нагрузка на каждую систему будет меняться в зависимости от количества работоспособных элементов (рисунок 1.5 «а»). В состав включены ПЧ, которые обеспечивают регулирование скорости вращения электродвигателя, соответственно и скорости передвижения самого крана. Преимуществом рассмотренного способа резервирования является повышение отказоустойчивости, за счет исключения из кинематической схемы крана дополнительных, как правило сложных, механических узлов и конструкций. Согласованная работа систем ЧРЭП способствует уменьшению пробуксовок и проскальзывания ведущих колес и в несколько раз уменьшает динамические нагрузки, вызывающие перекос металлоконструкций крана [15].

Алгоритм работы мажоритарной системы резервирования может быть реализован и по принципу замещения. На рисунке 1.5 «б» представлен диаграмма суммарного момента при работе мажоритарной системы «2 из 5», где в работе находятся первые три системы ЧРЭП, четвертая и пятая ЧРЭП включается только после выхода из строя первых. При этом мажоритарная система ЭП передвижения крана может работать по принципу холодного, теплого или горячего замещения, в зависимости от степени готовности резервной ЧРЭП.

Работа мажоритарной системы по принципу резервирования энергетически является более выгодной за счет снижения потерь в неработающих ПЧ и электродвигателях. Кроме того, сокращение непрерывной работы элементов системы положительным образом влияет на надежность.

Использование мажоритарного метода резервирования на производстве с использованием принципов замещения очень выгоден, так как есть возможность проведения оперативно-ремонтных и регламентных работ используемого оборудования без остановки производства.

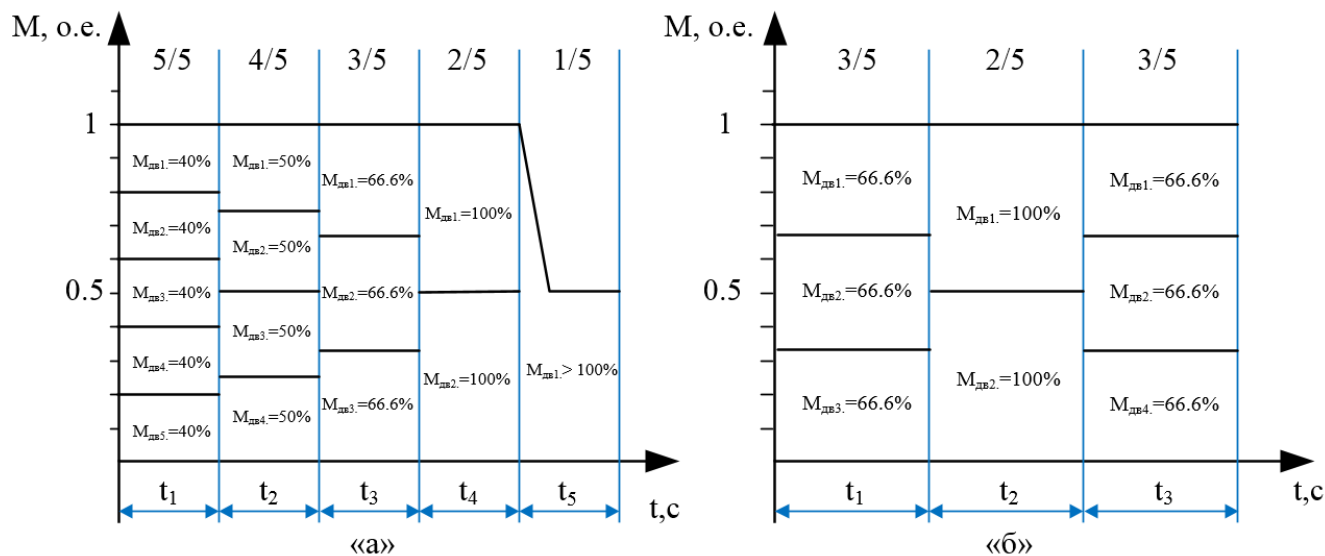


Рисунок 1.5 – Распределение момента сопротивления нагрузки в мажоритарной системе резервирования ЭП передвижения козлового крана

1.2 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника питания

1.2.1 Виды резервных источников питания для электропривода переменного тока

Надежность системы ЭП зависит не только от надежности ПЧ, электродвигателя и исполнительного механизма, но и от надежности системы электропитания. Для повышения отказоустойчивости на ответственных предприятиях, а также автономных объектах, применяют системы резервного электропитания в зависимости от категории энергопотребителя.

Методы резервирования электропитания можно разделить по аналогии с методами резервирования ЭП. При этом, резервные источники питания можно разделить принципиально по роду тока: резервные источники переменного тока и резервные источники постоянного тока.

Резервным источником переменного тока может являться отдельный ввод (фидер), дизель или газопоршневой генератор, а также генератор, работающий от

альтернативного источника энергии (ветроэнергетика, биоэнергетика, гелиоэнергетика, геотермальная энергетика, водородная энергетика и др.) [16; 17].

Резервная сеть постоянного тока может представлять собой машинный (электромашинный) генератор постоянного тока, источник постоянного напряжения, конденсаторные или суперконденсаторные установки, аккумуляторные батареи [18; 19; 67].

1.2.2 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника переменного тока

В зависимости от категории энергопотребителя резервный источник может работать совместно с основным (нагруженный резерв) или работать по принципу замещения (ненагруженный резерв). Резервный источник может работать с замещением по принципу автоматического включения резерва (АВР), то есть с помощью силовых ячеек и контакторов или в режиме ручного переключения, с помощью рубильников и переключателей [20].

На рисунке 1.6 представлена структурная схема мостиковой системы ЭП (мажоритарная схема) с возможностью электропитания каждого электродвигателя от двух независимых электросетей.

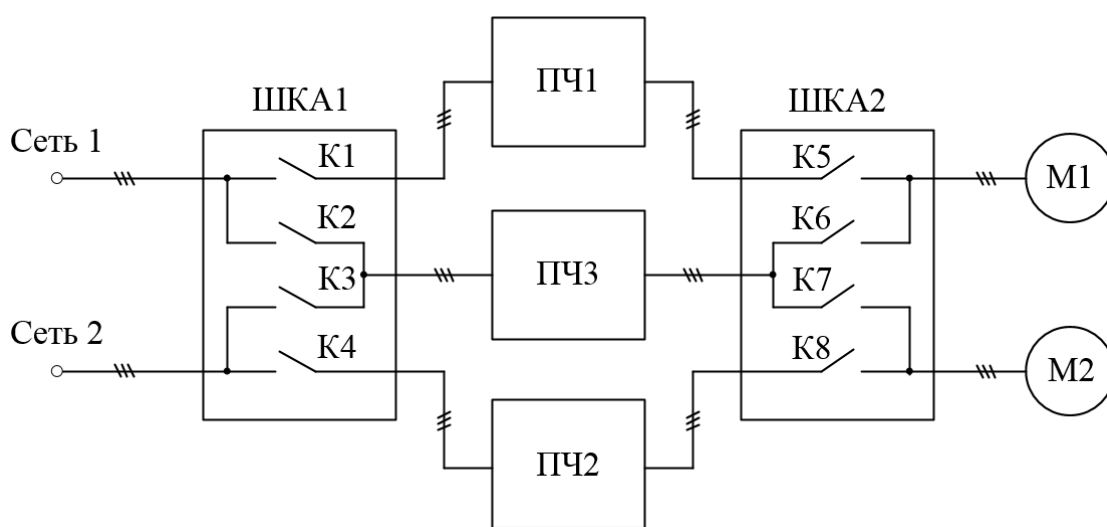


Рисунок 1.6 – Мостиковая система питания ЭП от двух независимых сетей переменного тока

На рисунке 1.6 были приняты следующие обозначения: К1...К8 – трехполюсные контакторы; ШКА – шкаф коммутационной аппаратуры.

Система электропитания построена по принципу дублирования. Каждый электродвигатель может работать от своего преобразователя (ПЧ1-М1, ПЧ2-М2), которые в свою очередь запитаны от индивидуальной сети переменного тока (Сеть1-ПЧ1, Сеть2-ПЧ2). Рассмотренный способ резервирования позволяет двум ЧРЭП работать от одной питающей сети (любой из двух). Мощность каждой сети выбирается исходя из суммарной мощности двух электродвигателей. В случае аварии сети 1, переключение питания электродвигателя М1 на резервную сеть 2 осуществляется автоматически с помощью контакторов К2 и К7 с использованием резервного ПЧ3, при этом исключается возможность одновременного включения контакторов К2 и К3 (К6 и К7). Резервный преобразователь ПЧ3 работает по принципу резервирования с замещением. Представленная система позволяет сохранить работоспособность двух электродвигателей при авариях любой из сетей или неисправностях одного из ПЧ.

Основной проблемой представленной структуры ЭП (рисунок 1.6) является вынужденная остановка электродвигателя под нагрузкой при переключениях. Время перехода с одной питающей сети на резервную в общем случае состоит из времени отключения/включения соответствующих контакторов, подготовки ПЧ к запуску электродвигателя и времени восстановления текущей заданной частоты вращения электродвигателя.

Работа аналогичной по своим функциональным возможностям системы ЭП, построенная по принципу теплого резервирования с замещением, будет рассмотрена далее.

1.3 Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника постоянного тока. Электропривод двойного электропитания

1.3.1 Системы электропривода двойного электропитания на автономных объектах

Несмотря на всемирную электрификацию, существует большое количество отдаленных или передвижных автономных комплексов (автономные объекты) с независимыми или альтернативными источниками питания. Как правило, на ответственных автономных объектах есть две сети: основная электросеть переменного тока и резервная сеть постоянного тока.

Резервная сеть постоянного тока может представлять собой машинный (электромашинный) генератор постоянного тока (система генератор-двигатель), источник постоянного напряжения (выпрямитель), конденсаторные или суперконденсаторные установки, аккумуляторные батареи.

Аккумуляторные батареи или вторичный химический источник тока наиболее распространенная и энергоемкая система хранения электрической энергии (теоретическая удельная электроёмкость может достигать 425 Вт·ч/кг) [21]. Одна из особенностей использования аккумуляторной батареи как источника питания, заключается в варьировании его выходных параметров. Так, диапазон выходного напряжения в процессе работы на нагрузку может изменяться от 10 до 50 % от номинального значения.

Одним из обязательных условий, принятых на автономных объектах, необходимость гальванической развязки основной сети переменного тока от резервной сети постоянного тока. Работа двух электросетей не зависит друг от друга, что положительным образом влияет на надежность системы в целом. Гальваническую развязку возможно обеспечить либо с помощью коммутационной аппаратуры, либо с помощью трансформатора или дополнительного электродвигателя.

При проектировании систем ЭП, работающих на автономных объектах, необходимо учитывать тот факт, что данные комплексы в большинстве случаев мобильны. Поэтому, массогабаритные показатели системы являются основными критериями при выборе принципиальной схемы частотно-регулируемого ЭП.

1.3.2 Электропривод двойного электропитания с двумя электродвигателями

Структурная схема резервирования от резервной сети постоянного тока (аккумуляторные батареи) с помощью дополнительного двигателя представлена на рисунке 1.7.

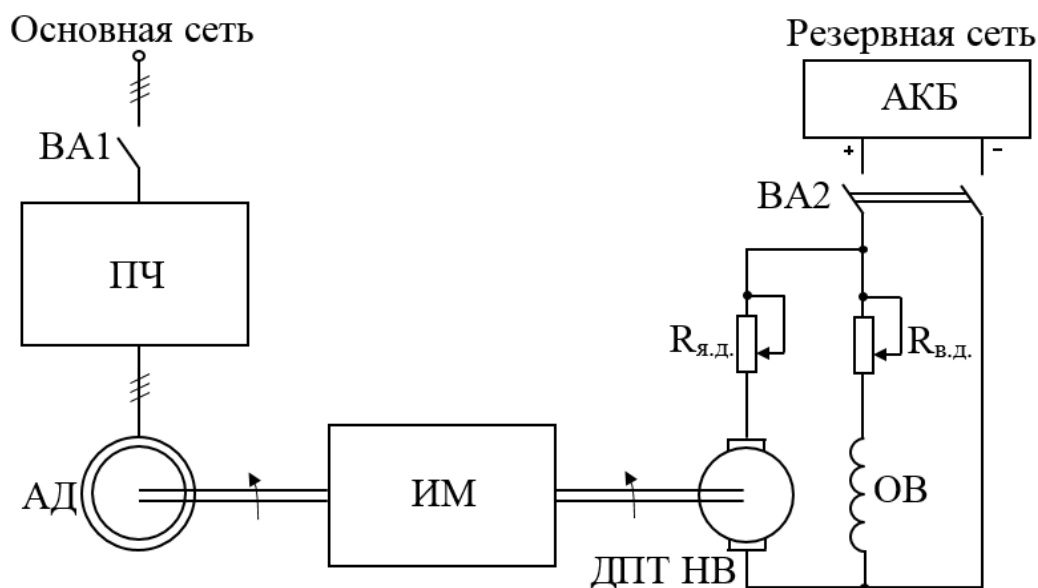


Рисунок 1.7 – Структурная схема резервирования дополнительным электродвигателем

На рисунке 1.7 были приняты следующие обозначения: ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный двигатель; ИМ – исполнительный механизм; ДПТ НВ – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; ОВ – обмотка возбуждения; $R_{я.д.}$, $R_{в.д.}$ – дополнительные регулировочные сопротивления обмотки якоря и обмотки возбуждения соответственно; АКБ – аккумуляторные батареи; ВА – автоматический выключатель.

На рисунке 1.7 представлен ЭП с полным резервированием приводного электродвигателя, его источника питания, силовой части, а также системы управления. Регулирование частоты вращения ИМ в данном случае возможно, как асинхронным двигателем с помощью ПЧ, который запитан от основной сети, так и с помощью ДПТ НВ, который напрямую запитан от резервной сети постоянного тока. ЭП в данном случае работает по принципу холодного замещения по питанию, так как постоянная работа от аккумуляторных батарей не целесообразна из-за их ограниченной емкости. Скорость вращения ДПТ НВ определяется напряжением питания, которое варьируется у АКБ в большом диапазоне. Стабилизировать необходимую скорость вращения ДПТ НВ можно с помощью дополнительных сопротивлений в цепи якоря и цепи возбуждения, при этом номинальное напряжение двигателя выбирается ниже максимального заряда АКБ [22]. Использование дополнительных сопротивлений приведет к снижению КПД и дополнительным тепловым потерям, что в рабочем помещении с ограниченным пространством может быть недопустимо. Другой вариант регулирования ДПТ НВ от резервного источника ограниченной мощности (со снижением входного напряжения) возможен если применить промежуточный силовой преобразователь, который обеспечит стабилизацию напряжения питания машины постоянного тока. При этом не стоит забывать, что ДПТ НВ имеет свои недостатки, связанные с щеточно-коллекторным узлом, массогабаритными показателями и высокой стоимостью.

Стоит отметить, что применения полного резервирования приводных электродвигателей, источника питания и системы управления оправдана только в тех технологических процессах, к которым предъявляются самые строгие требования по надежности, поскольку описанные выше решения в несколько раз увеличивают итоговую стоимость ЭП. При этом, модернизация уже существующей системы ЭП с внедрением дополнительного электродвигателя на автономных объектах зачастую невозможна из-за ограниченного объема электротехнического помещения и необходимости адаптировать механическую часть под двухдвигательный ЭП.

1.3.3 Трехфазный гальванически развязанный преобразователь для систем электропривода двойного питания

В настоящее время широкое распространение получили различные статические преобразователи на основе устройств силовой электроники [65]. На рисунке 1.8 представлен ЭП с возможностью питания от двух независимых источников электроэнергии, с частичным резервированием силовой части системы управления электродвигателя.

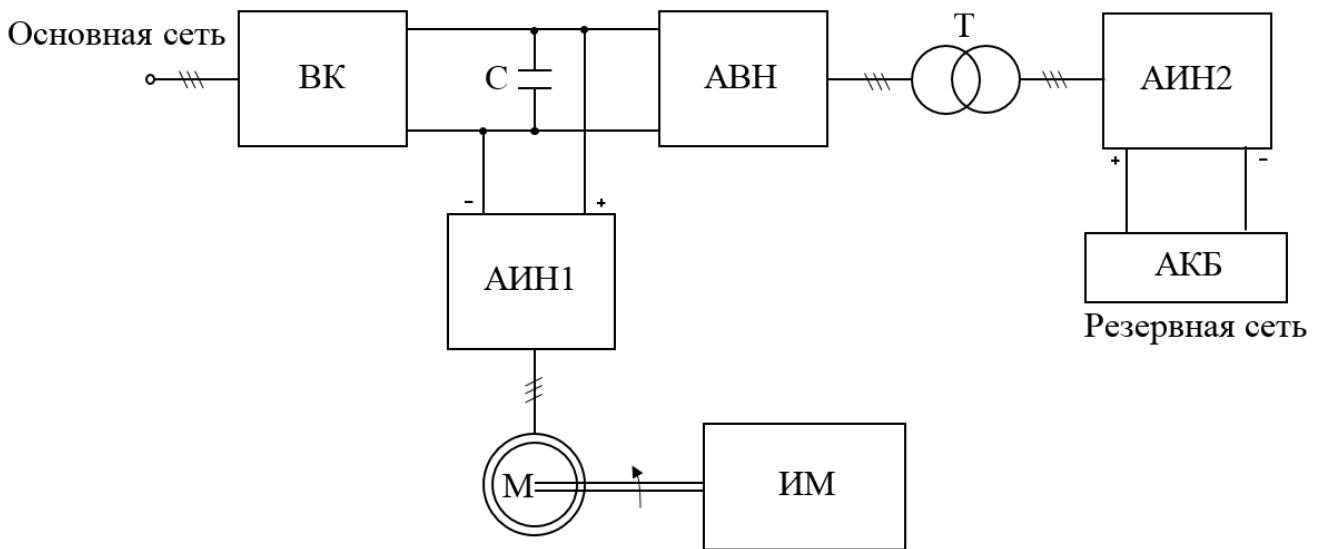


Рисунок 1.8 – ЭП двойного питания с применением трехфазного гальванически развязанного преобразователя

Под основной сетью понимается электросеть переменного тока, которая реализована с помощью стационарной подстанции. Питание частотно-регулируемого электродвигателя переменного тока от основной сети чаще всего осуществляется с помощью двухзвенного ПЧ. ПЧ в общем случае состоит из неуправляемого или полууправляемого выпрямительного комплекта (ВК), емкостного фильтра (С) или звена постоянного тока (ЗПТ) и автономного инвертора напряжения (АИН).

Работа от резервного источника ограниченной мощности, которым является аккумуляторная батарея, реализована с помощью трехфазного двунаправленного преобразователя DC-AC-DC [23]. Преобразователь DC-AC-DC состоит из

трехфазного автономного инвертора напряжения, промежуточного трансформатора и активного выпрямителя напряжения (АВН) или рекуператора. С целью уменьшения массогабаритных показателей, частота промежуточного напряжения переменного тока (выход АИН) может быть увеличена. Так, возможно сформировать промежуточное напряжение частотой 400...1000 Гц и более, при этом необходимо скорректировать частоту ШИМ АИН и АВН в большую сторону и использовать трансформатор специальной конструкции, который рассчитан на более высокие частоты питания. Использование более высокой частоты промежуточного напряжения оправдано лишь там, где габаритные размеры электрооборудования играют ключевую роль. Трансформатор выполняет функцию гальванической развязки, а коэффициент трансформации выбирается из отношений напряжения ЗПТ и напряжения АКБ. Преобразователь DC-AC-DC двунаправленный, что позволяет эффективно использовать энергию торможения с помощью которой можно подзарядать АКБ. Режим заряда АКБ возможен и от основной сети переменного тока, при этом мощность выпрямительного комплекта и емкостного фильтра выбираются с необходимым запасом.

Очевидно, что питание электродвигателя от резервной сети осуществляется только при недопустимых параметрах основной сети или ее исчезновении. Отсутствие коммутационной аппаратуры минимизирует время перевода питания с основной сети на резервную сеть, и обратно. Применение DC-AC-DC преобразователя позволяет реализовать принцип горячего замещения источника питания без потери производительности. Время переходного процесса в рассмотренной системе резервирования должно находиться в диапазоне от 15 мс до 30 мс.

Еще одним решением является исключение из схемы АВН и подключение промежуточного трансформатора на вход выпрямительного комплекта. Такая топология силовой схемы является менее рациональной с точки зрения отказоустойчивости системы в целом и не позволяет реализовать тормозные режимы ЭП с большим моментом инерции на валу [24].

1.3.4 Преобразователи постоянного тока в постоянный для электропривода двойного питания

На рисунке 1.9 представлен еще один вариант ЧРЭП с питанием от двух независимых электросетей.

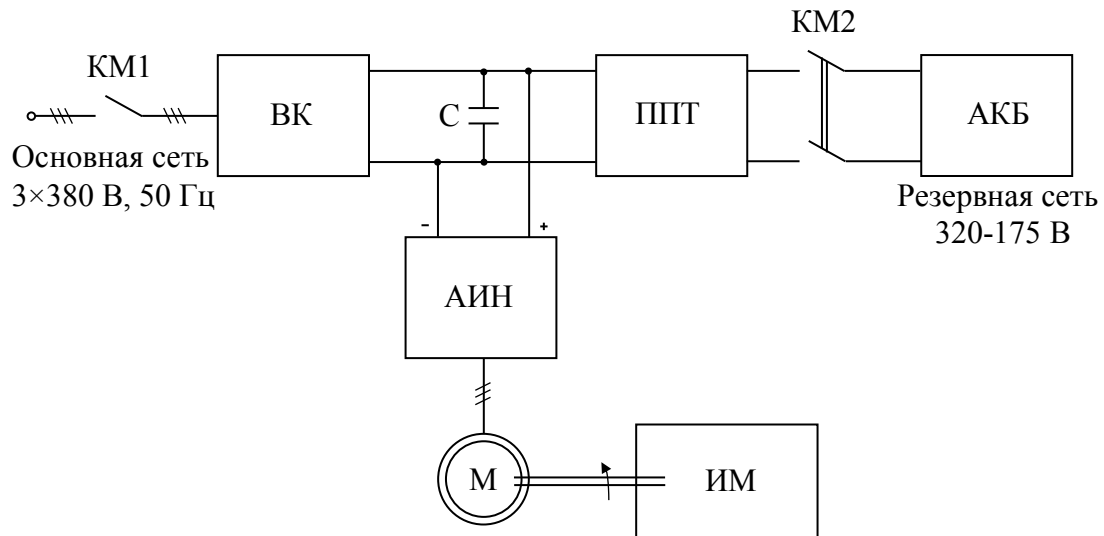


Рисунок 1.9 – ЭП двойного питания с применением преобразователя постоянного тока в постоянный

В качестве промежуточного устройства между звеном постоянного тока и аккумуляторной батареей используется преобразователь постоянного тока в постоянный (ППТ) [25]. ППТ является повышающим преобразователем, его основная функция 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 ППТ наиболее целесообразно выполнить по классической схеме DC-DC step-up converter [26]. Преобразователь, выполненный по такой схеме, работает по принципу накопления энергии в реактивном элементе входной цепи (индуктивности) и дальнейшей передачи этой энергии в реактивный элемент выходной цепи (конденсатор). Процесс накопления и передачи энергии в реактивных элементах разделены по времени. Основным преимуществом DC-DC

step-up преобразователя является относительно простая силовая схема с минимальным количеством полупроводниковых приборов. В системах ЭП двойного питания с использованием DC-DC step-up converter гальваническая развязка между основной и резервной сетью реализуется с помощью коммутационной аппаратуры (KM1, KM2). В данном случае работа электропитания ЭП реализована по принципу теплого резервирования с замещением, так как время переключения питания с одной сети на другую может составлять до 1,5 с. Данная выдержка времени суммируется из времени на отключение контактора KM1, фиксации надежного размыкания и включения контактора KM2, начала работы ППТ.

Работа ЭП по принципу горячего резервирования с замещением можно реализовать с помощью двунаправленного гальванически развязанного преобразователя постоянного тока в постоянный (Isolated Bidirectional DC-DC Converters). Силовая часть гальванически развязанного ППТ состоит из двух H-мостов, высокочастотного трансформатора и дросселя [27]. Управление преобразователем осуществляется с помощью относительного угла сдвига входного и выходного меандра напряжений. Повышающий высокочастотный трансформатор выполняет роль гальванической развязки основной сети переменного тока от резервной сети постоянного тока, тем самым исключается потребность в коммутации контакторов KM1 и KM2. Следовательно, время перехода с одной сети на другую и обратно может составлять менее 20 мс, что фактически позволяет реализовать бесперебойное питание ЭП без существенной просадки производительности технологического процесса. Высокая частота коммутации транзисторов позволяет существенно снизить массогабаритные показатели преобразователя, но усложняет технологию производства необходимого высокочастотного трансформатора и дросселя. Следует отметить, что данный ППТ является двунаправленным, благодаря чему возможны следующие режимы работы: стабилизация напряжения звена постоянного тока при работе от резервной сети; работа электродвигателя в режиме торможения с возможностью рекуперации энергии в резервный источник (аккумуляторные

батареи); заряд резервного источника (аккумуляторных батарей) от основной сети, при этом выпрямительный комплект ПЧ также необходимо выбрать с запасом по мощности.

Более подробная работа ППТ, математическое описание и алгоритмы работы ЭП двойного питания будут рассмотрены в следующих главах.

1.3.5 Массогабаритные показатели частотно-регулируемых электроприводов двойного питания

В таблице 1 приведены ориентировочные массогабаритные показатели частотно-регулируемых ЭП двойного питания мощностью 55 кВт.

Таблица 1 – Массогабаритные показатели ЭП двойного питания

Электропривод двойного электропитания с двумя электродвигателями ¹					
	Масса, кг	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Объем, м ³
ПЧ	150	650	460	1150	0,344
АДКЗР	345	1012	376	460	0,175
ДПТ НВ	520	1105	505	545	0,304
Блок резисторов и коммутационной аппаратуры	90	650	450	1200	0,351
Всего	1105				1,174
ЭП двойного электропитания с трехфазным гальванически развязанным DC-AC-DC преобразователем ²					
	Масса, кг	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Объем, м ³
ВК+ЗПТ+АИН1	150	650	460	1150	0,344
АИН2+АВН	90	650	460	850	0,254
Трансформатор	224	706	463	560	0,183

Продолжение таблицы 1

АДКЗР	345	1012	376	460	0,175
Всего	809				0,956
Электропривод двойного электропитания с гальванически развязанным ППТ ³					
	Масса, кг	Длинна, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Объем, м ³
ВК+ЗПТ+АИН	150	650	460	1150	0,344
ППТ	95	490	450	1600	0,353
АДКЗР	345	1012	376	460	0,175
Всего	590				0,872
ЭП двойного электропитания с гальванически не развязанным ППТ ⁴					
ПЧ+ППТ	229	600	440	1610	0,425
АДКЗР	345	1012	376	460	0,175
Всего	574				0,6

1 – АДКЗР – асинхронный двигатель АИР225М4 55 кВт, 1500 об/мин; ДПТ НВ – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением серии 2ПН250МУХЛ4 55 кВт, 1500 об/мин. Регулировочные резисторы типа ИРАК 434332.004. Регулировка частоты вращения осуществляется ступенчато.

2 – Для уменьшения массогабаритных размеров трансформатор был выбран на частоту 400 Гц. Тип трансформатора ТСЗМ-70-0,4.

3 – Повышающий трансформатор и дроссель рассчитаны на частоту 20 кГц.

4 – Размеры предоставлены с учетом контакторов КМ1 и КМ2.

Выводы по главе

1. Рассмотрены общие вопросы резервирования частотно-регулируемого ЭП. Методы резервирования существенно увеличивают безотказность и надежность системы в целом. При этом, существенно увеличиваются массогабаритные показатели и экономические затраты, поэтому полное резервирование ЭП оправдано лишь на объектах повышенной ответственности, а также автономных электротехнических комплексах. Модернизация существующего оборудования еще одним резервным комплектом, в следствии ограниченности объема электротехнического помещения и принятых кинематических схемах механизмов, зачастую не возможна.

2. Надежность ЭП напрямую зависит от надежности питающей сети. Представлены основные проблемы в ЭП при кратковременных сбоях электропитания. Рассмотрена работа ЭП от двух независимых сетей. Предложены схмотехнические решения мажоритарной системы ЭП с питанием от двух независимых сетей переменного тока.

3. Рассмотрены различные системы ЭП с двойным электропитанием. Представлены основные требования, предъявляемые к мобильным автономным объектам. Частотно-регулируемый ЭП двойного электропитания с применением ППТ имеет наименьшие массогабаритные показатели, по сравнению рассмотренными способами резервирования питающей сети. Работа ЭП с применением гальванически развязанного ППТ обеспечивает работу системы по принципу горячего резервирования с замещением.

ГЛАВА 2 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ

2.1 Силовая схема и принцип работы гальванически развязанного двунаправленного преобразователя постоянного тока в постоянный

Двунаправленный преобразователь работает в составе ЭП двойного электропитания и предназначен для стабилизации напряжения звена постоянного тока ПЧ при работе от источника постоянного напряжения. На рисунке 2.1 изображена электрическая силовая схема двунаправленного гальванически развязанного преобразователя постоянного тока (ППТ) в постоянный [27]. Вход преобразователя подключается к источнику постоянного напряжения (U_1) или аккумуляторной батареи, выход соответственно к звену постоянного тока ПЧ (U_2).

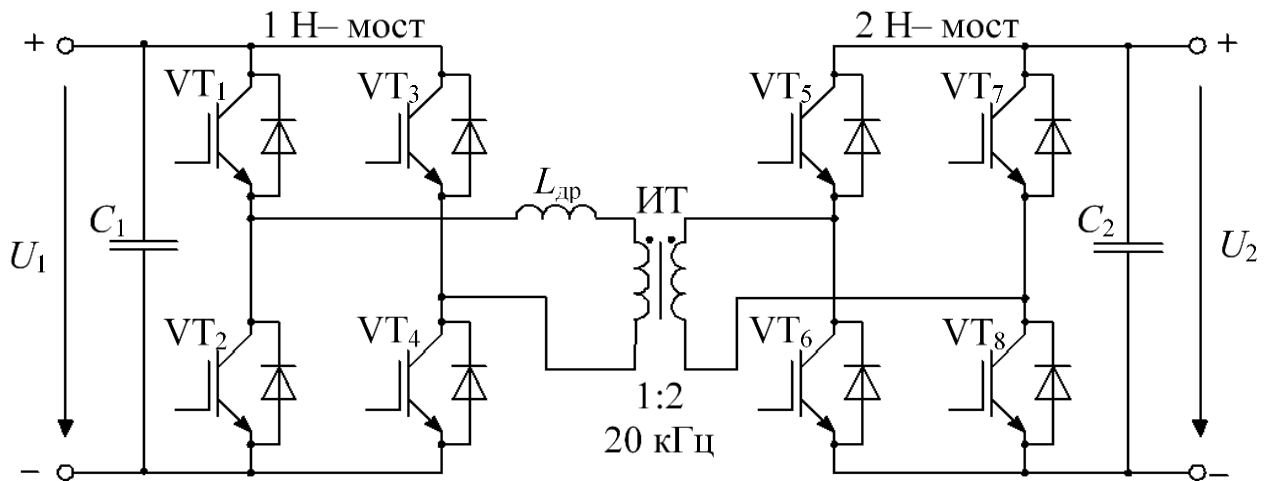


Рисунок 2.1 – Электрическая схема силовой части ППТ

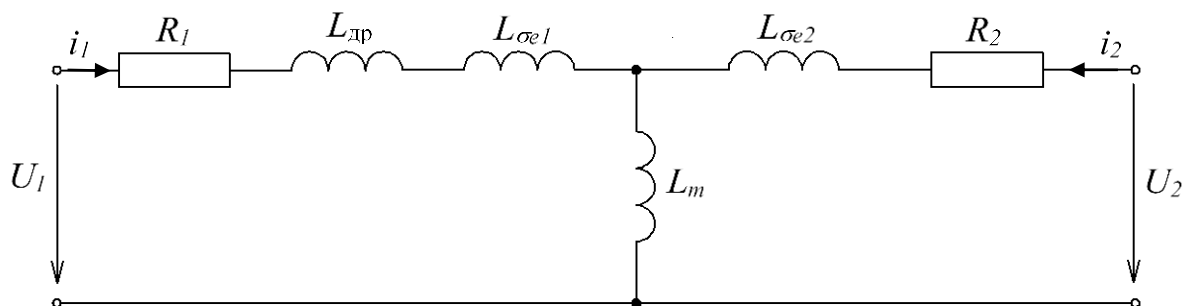
На рисунке 2.1 были приняты следующие обозначения: $VT_1...VT_8$ – IGBT транзисторы, ИТ – высокочастотный импульсный трансформатор; C_1, C_2 – звено постоянного тока первичной и вторичной стороны ППТ соответственно; $L_{др}$ – дроссель.

Силовая часть преобразователя построена на основе двух активных H-мостов, дросселя, высокочастотного повышающего трансформатора, входной и выходной емкостей.

Каждый активный H-мост состоит из четырех полупроводниковых ключей. Для маломощных преобразователей (до 3 кВт) чаще всего используют MOSFET-транзисторы, которые имеют малые тепловые потери и высокую частоту коммутации. Для преобразователей средней (от 3 кВт до 10 кВт) и большой (свыше 10 кВт) мощности используют IGBT-транзисторы, которые работают на частоте коммутации до 25 кГц. Работа H-моста основана на поочередном включении двух транзисторов, так для формирования положительного напряжения в диагонали моста необходимо включить транзисторы VT_1 и VT_4 , а для формирования отрицательного напряжения транзисторы VT_2 и VT_3 .

Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку между резервной и основной сетью. Трансформатор является повышающим, коэффициент трансформации необходимо выбирать исходя из номинальных значений напряжений вторичной и первичной стороны. Последовательно первичной обмотке трансформатора устанавливается дроссель, так как индуктивности трансформатора зачастую недостаточно для специальных режимов работы ППТ, в частности для работы при кратковременных перегрузках, вызванных увеличением момента сопротивления нагрузки ЭП, или значительными просадками первичного напряжения (U_1).

Схема замещения импульсного трансформатора и дросселя представлена на рисунке 2.3.



Рисунке 2.3 – Схема замещения импульсного трансформатора

Система дифференциальных уравнений баланса напряжений трансформатора согласно представленной схеме замещения, по второму закону Кирхгофа

$$\begin{cases} U_1 = R_1 i_1 + (L_{др} + L_{\sigma e1}) \frac{di_1}{dt} + L_m \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right), \\ U_2 = R_2 i_2 + L_{\sigma e2} \frac{di_2}{dt} + L_m \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right), \end{cases} \quad (2.1)$$

где U_1, U_2 – напряжение первичной и вторичной стороны ППТ; i_1, i_2 – токи первичной и вторичной обмоток трансформатора; R_1, R_2 – активное сопротивление обмоток импульсного трансформатора; $L_{\sigma e1}, L_{\sigma e2}$ – индуктивность рассеяния трансформатора; L_m – взаимоиנדуктивность обмоток трансформатора.

Система уравнений (2.1) в операторной форме записи имеет вид, где $p = \frac{d}{dt}$

$$\begin{cases} U_1 = (R_1 + (L_{др} + L_{\sigma e1} + L_m)p)i_1 + L_m p i_2, \\ U_2 = L_m p i_1 + (R_2 + (L_{\sigma e2} + L_m)p)i_2. \end{cases} \quad (2.2)$$

Система уравнений (2.2) в матричной форме

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + (L_{др} + L_{\sigma e1} + L_m)p & L_m p \\ L_m p & R_2 + (L_{\sigma e2} + L_m)p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Активное сопротивление обмоток импульсного трансформатора пренебрежимо мало, в дальнейшем будем полагать, что $R_1 = 0, R_2 = 0$. Тогда уравнение (2.3) примет вид

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot p \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} (L_{др} + L_{\sigma e1} + L_m) & L_m \\ L_m & (L_{\sigma e2} + L_m) \end{bmatrix}$ – матрица индуктивностей.

В соответствии с выражением (2.4) структурная схема импульсного трансформатора представлена на рисунке 2.4.

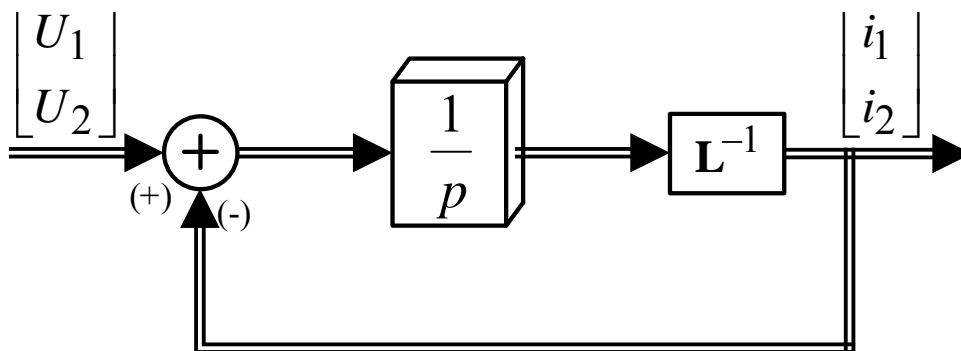


Рисунок 2.4 – Структурная схема импульсного трансформатора

Производная первичного тока (входного тока) согласно выражению (2.1)

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_1 - U_2'}{L_{\text{пр}}}, \quad (2.5)$$

где $U_2' = U_2 k_{\text{тр}}^{-1}$ – приведенное вторичное напряжение к первичной стороне трансформатора; $L_{\text{пр}} = L_{\sigma e1} + L_{\sigma e2} + L_{\text{др}}$ – приведенная индуктивность трансформатора; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации.

На рисунке 2.5 представлены эпюры тока и напряжений согласно выражению 2.5.

На рисунке 2.5 были приняты следующие обозначения: δ – относительный угол сдвига первичного и вторичного напряжения; U_L – разница в эпюрах напряжений; I_1 – ток первичной стороны трансформатора.

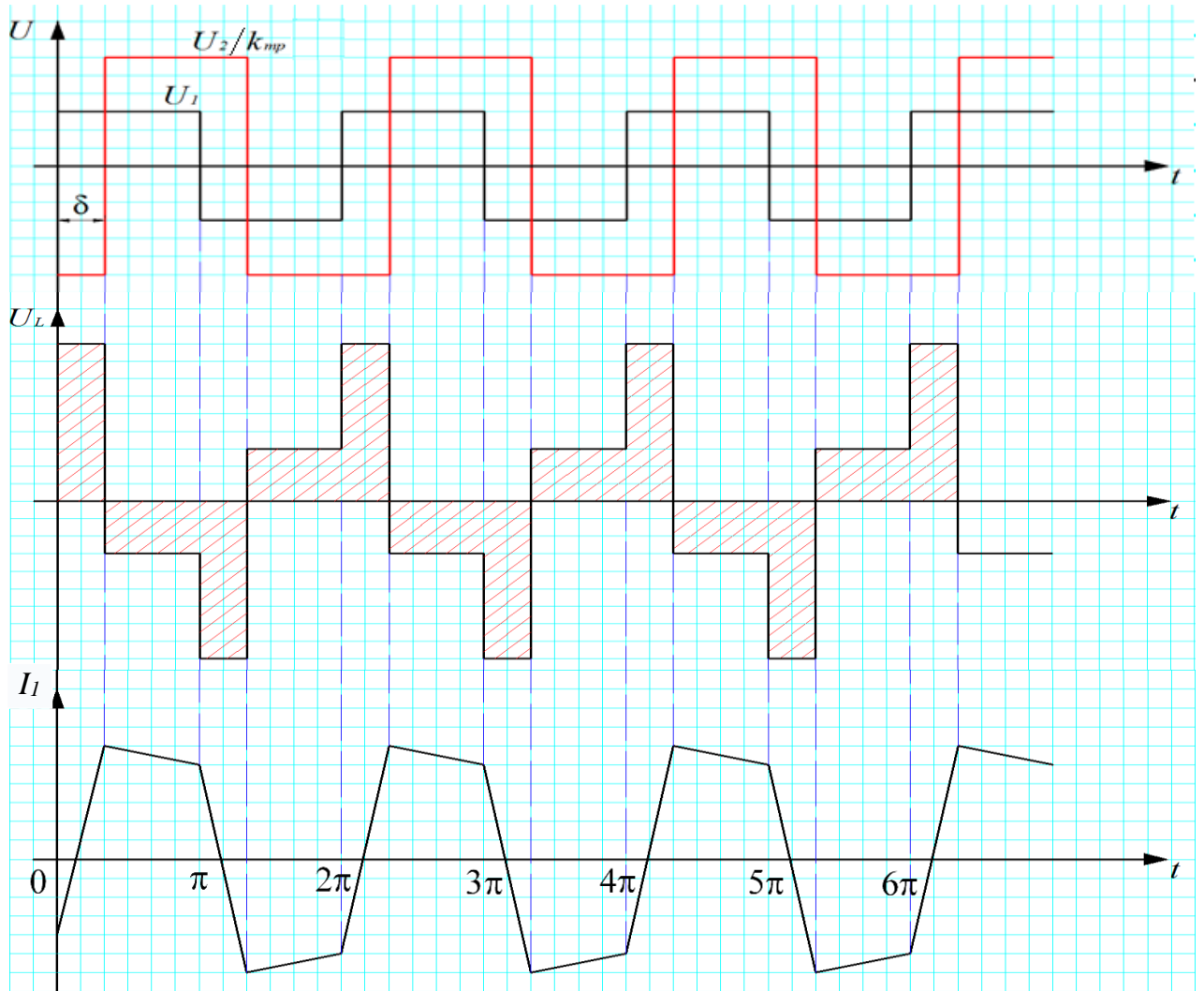


Рисунок 2.5 – Эпюры тока и напряжений ППТ

Среднее значение первичного тока без учета мертвого времени, активных сопротивлений трансформатора и дросселя, а также падений напряжения на полупроводниковых приборах [28; 29]

$$I_{\text{ср1}} = \frac{U_2}{2\pi f_{\text{к}} L_{\text{пр}} k_{\text{тр}}} \left(\delta - \frac{\delta^2}{\pi} \text{sign}(\delta) \right), \quad (2.6)$$

где $f_{\text{к}}$ – частота дискретизации преобразователя.

Мощность ППТ определяется выражением

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_1 U_2}{2\pi f_{\text{к}} L_{\text{пр}} k_{\text{тр}}} \left(\delta - \frac{\delta^2}{\pi} \text{sign}(\delta) \right). \quad (2.7)$$

В соответствии с выражением (2.7), изменяя относительный угол сдвига меандров напряжений, можно регулировать выходную мощность преобразователя. На рисунке 2.6 представлены регулировочные характеристики ППТ с номинальной мощностью 60 кВт, при следующих параметрах силовой схемы: $U_1 = 175...320$ В, $U_2 = 540$ В, $f_k = 20$ кГц, $L_{\text{пр}} = 3$ мкГн, $k_{\text{тр}} = 2$.

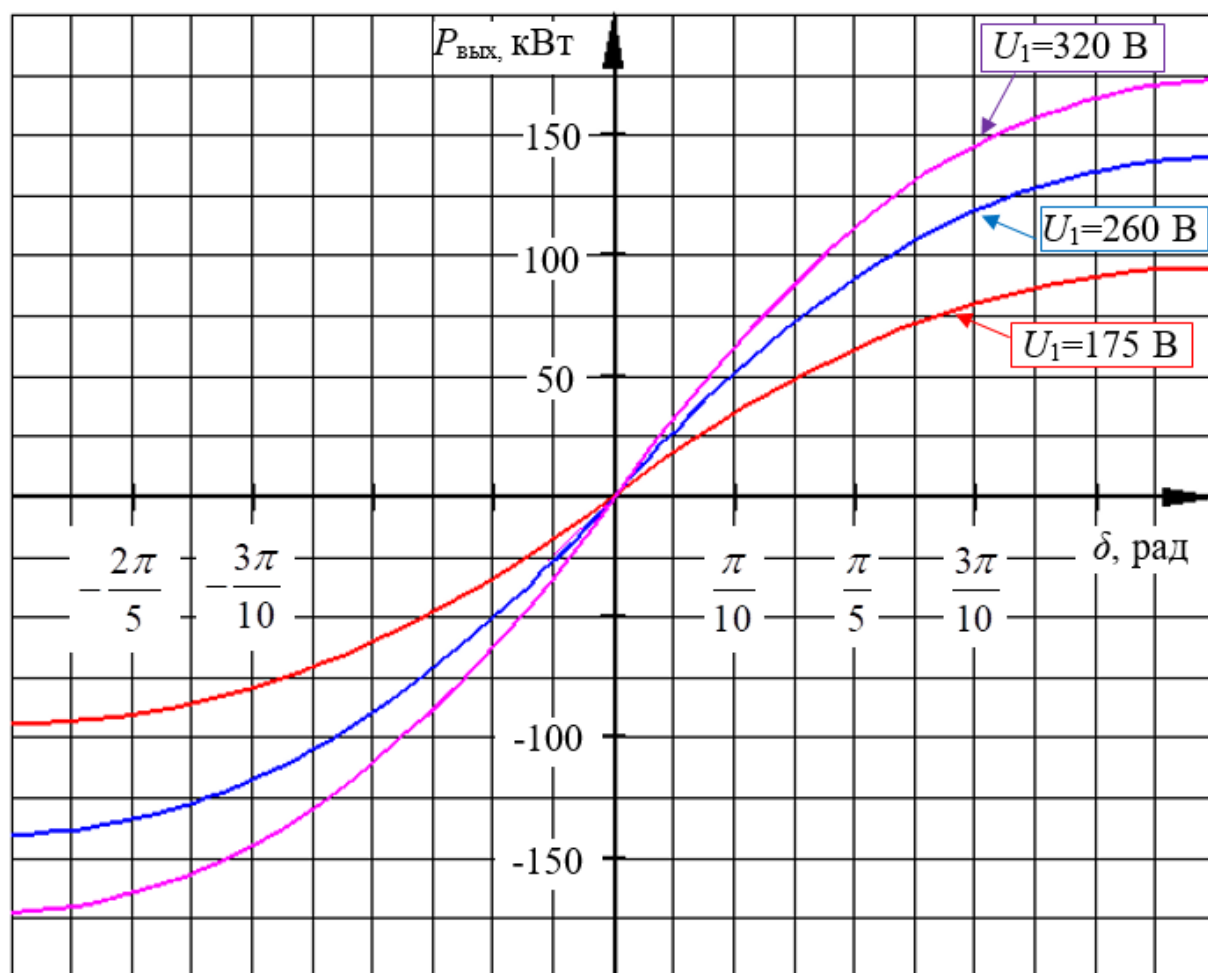


Рисунок 2.6 – Регулировочные характеристики ППТ

Регулировочная характеристика ППТ симметрична относительно точки пересечения осей координат, что позволяет осуществить работу преобразователя в двунаправленном режиме передачи мощности. Режим заряда резервного источника возможен в двух случаях: в режиме принудительного торможения электродвигателя (генераторный режим); в режиме заряда аккумуляторов от основной сети, при этом мощность выпрямительного комплекта ПЧ выбирается с необходимым запасом.

2.2 Синтез и исследование системы управления двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока

Основным регулируемым параметром двунаправленного ППТ является его выходное напряжение или напряжение звена постоянного тока автономного инвертора напряжения ПЧ. Исходя из этого, структура системы управления ППТ (рисунок 2.7), построенная по принципу подчиненного регулирования, является системой стабилизации выходного напряжения [30].

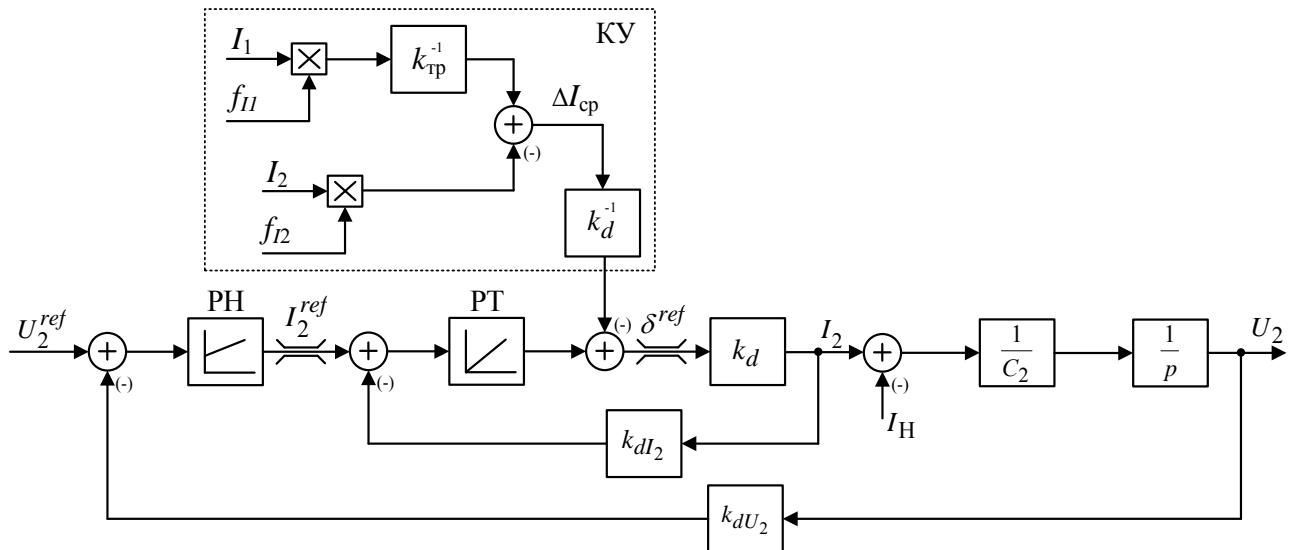


Рисунок 2.7 – Структурная схема системы управления ППТ

На рисунке были 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 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 [31]. Для исключения влияния подмагничивания трансформатора постоянным током используется корректор относительного угла сдвига, работа которого представлена на рисунке 2.8.

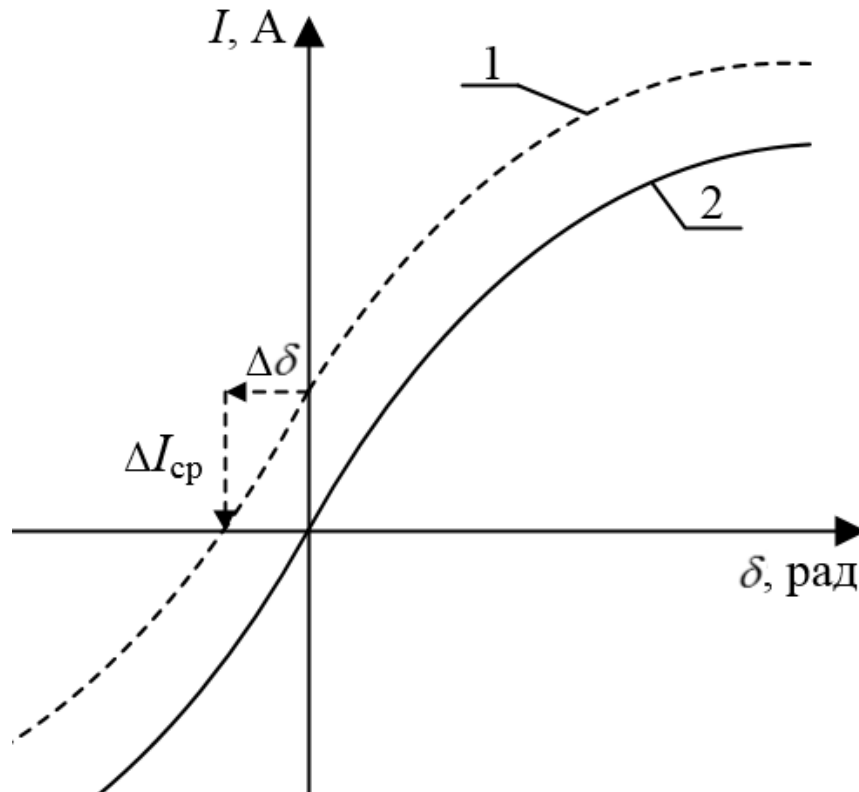


Рисунок 2.8 – Работа корректора относительного угла сдвига

На рисунке 2.9 представлены регулировочные характеристики выходного тока ППТ при различных значениях входного напряжения. Транзисторные преобразователи в структуре ППТ принимаются безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_d , что существенно упрощает расчет параметров системы управления [32]. Данное упрощение допустимо, так как собственная частота контура тока ППТ более чем в 20 раз меньше частоты коммутации силовых транзисторов [33]. Предлагаемая линеаризация регулировочных характеристик проводилась в точке при номинальных параметрах, как показано на рисунке 2.9.

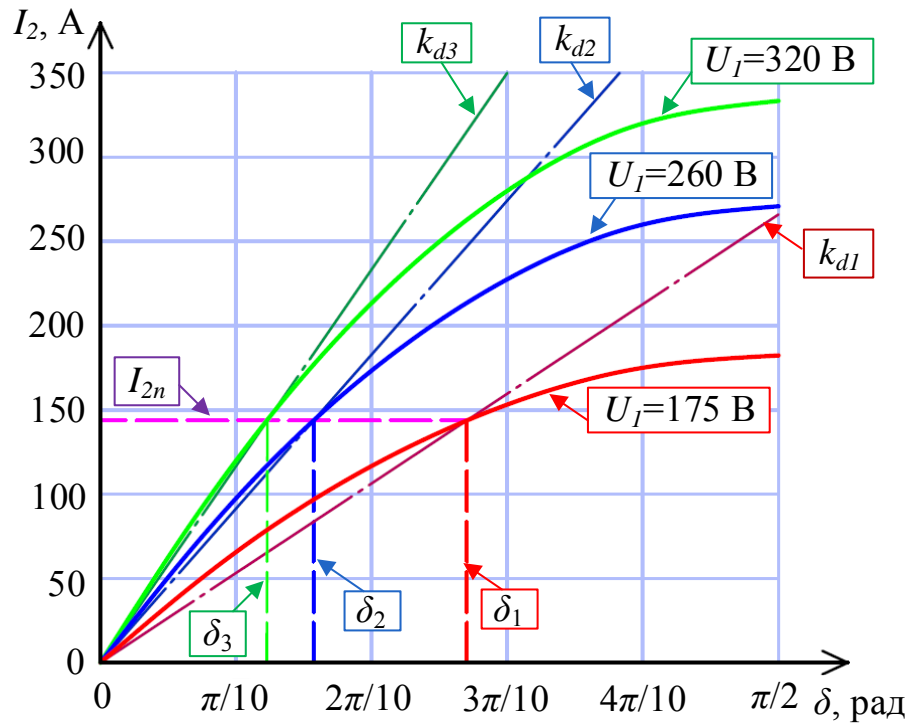


Рисунок 2.9 – Регулировочные характеристики ППТ и их линеаризация

Согласно выполненной процедуре линеаризации, замкнутый контур выходного тока ППТ примет вид (рисунке 2.10).

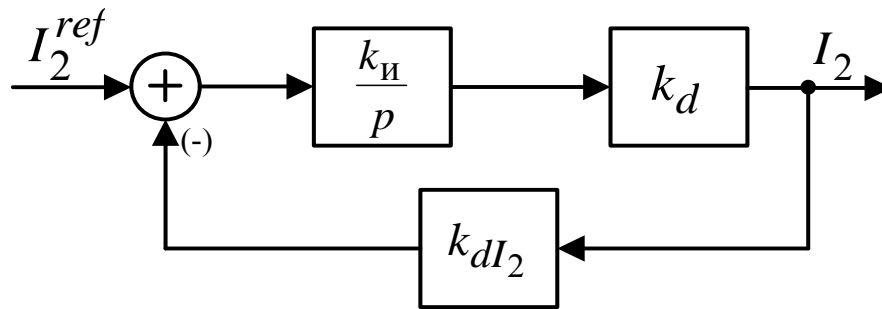


Рисунок 2.10 – Замкнутый контур выходного тока ППТ

Отдельный контур регулирования тока ППТ необходим для формирования желаемых по форме и качеству переходных процессов тока заряда емкостей, а также для ограничения максимального тока и регулирования мощности, передаваемую в звено постоянного тока ПЧ.

Передаточная функция замкнутого контура тока будет равна

$$W_{\text{КРТ}}^{\text{зам}}(p) = \frac{\frac{1}{k_d I_2}}{\frac{1}{k_i k_d k_d I_2} p + 1}, \quad (2.8)$$

где k_i – интегральный коэффициент регулятора тока.

Для нахождения интегрального коэффициента необходимо передаточную функцию замкнутого контура приравнять к желаемой

$$W_{\text{жел}}^{\text{зам}}(p) = \frac{1}{\frac{1}{\Omega_{\text{жел}}} p + 1}, \quad (2.9)$$

где $\Omega_{\text{жел}} = \frac{2\pi \cdot f_{\text{дис}}}{k_{\text{рд1}}}$ – желаемое быстродействие КРТ; $k_{\text{рд1}}$ – коэффициент разделения движения контура тока (для обеспечения устойчивой работы $k_{\text{рд1}} > 10$).

Тогда коэффициент интегральной части регулятора будет равен

$$k_i = \frac{\Omega_{\text{жел}}}{k_d k_d I_2}. \quad (2.10)$$

На рисунке 2.11 представлен переходной процесс в контуре регулирования тока, при подаче на его задающий вход единичного ступенчатого воздействия. Параметры ППТ, расчет коэффициентов регуляторов, а также структурные модели и командный файл в пакете программ Matlab представлены в приложении А.

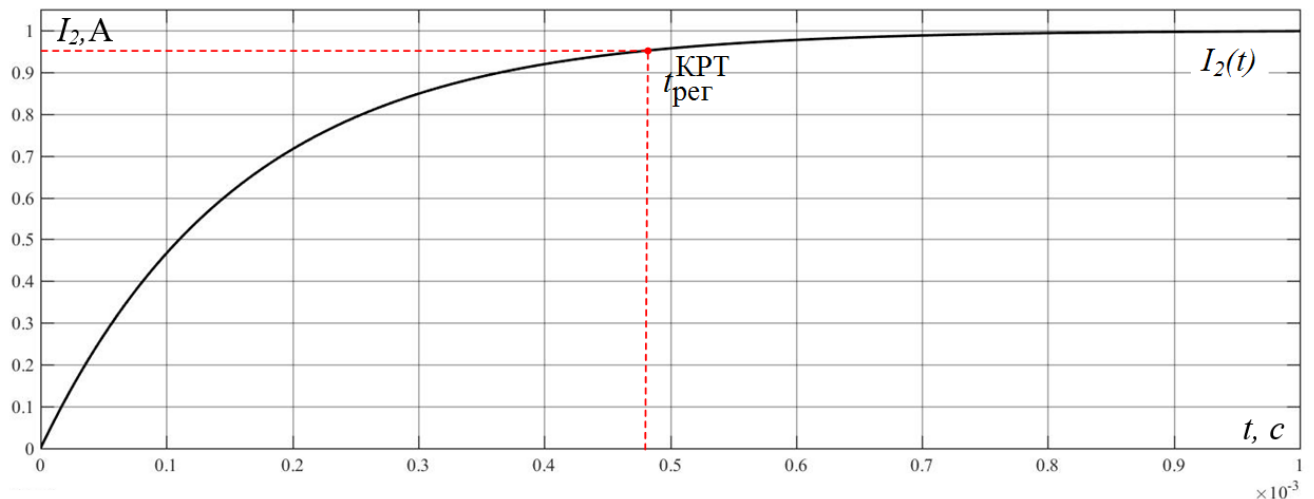


Рисунок 2.11 – Переходной процесс контура регулирования тока

Постоянная времени контура $T_{\text{крт}} = 1,5915 \cdot 10^{-4}$ с. Время регулирования переходного процесса составляет $t_{\text{рег}}^{\text{КРТ}} = 4,77 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствует трем постоянным времени. Следовательно, динамика КРТ ППТ соответствует желаемым результатам.

На рисунке 2.12 изображен замкнутый контур регулирования выходного напряжения ППТ.

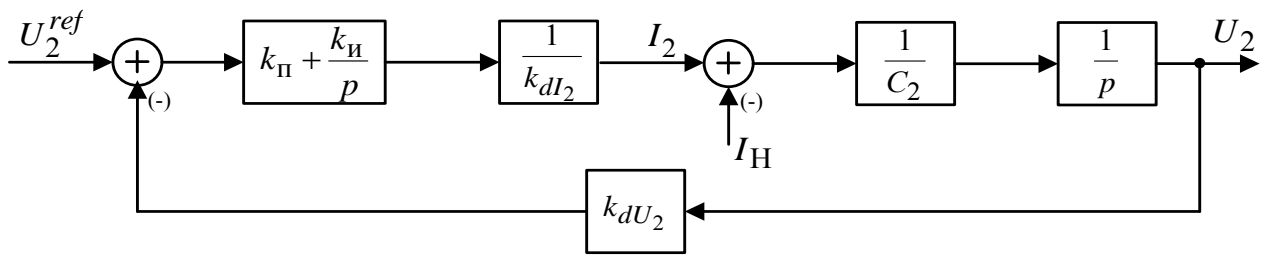


Рисунок 2.12 – Контур регулирования выходного напряжения ППТ

Передаточная функция замкнутого контура регулирования напряжения по управляющему воздействию

$$W_{\text{КРН}}^{\text{зам}}(p) = \frac{\frac{k_{\text{П}}}{k_{\text{Э}}} p + \frac{k_{\text{И}}}{k_{\text{Э}}}}{p^2 + \frac{k_{\text{П}} k_{dU_2}}{k_{\text{Э}}} p + \frac{k_{\text{И}} k_{dU_2}}{k_{\text{Э}}}}, \quad (2.11)$$

где эквивалентный коэффициент равен $k_{\text{Э}} = k_{dI_2} C_2$; C_2 – суммарная емкость конденсаторов выходного звена постоянного тока.

Для расчёта коэффициентов интегральной и пропорциональной части регулятора необходимо приравнять знаменатель замкнутой передаточной функции (2.11) к нормированному полиному. Нормированный полином имеет вид [50]

$$N(p) = p^2 + A_1 \Omega_{\text{н}} p + \Omega_{\text{н}}^2, \quad (2.12)$$

где A_1 – коэффициент формы переходного процесса (для обеспечения монотонного переходного процесса была выбрана стандартная биномиальная настройка, где для полинома второго порядка коэффициент $A_1 = 2$); $\Omega_{\text{н}} = \Omega_{\text{жел}} k_{\text{рд2}}^{-1}$ –

среднегеометрический корень нормированного полинома, согласно условию разделения частот.

Если приравнять знаменатель выражения (2.11) и нормированный полином (2.12), то коэффициенты интегральной и пропорциональной части регулятора будут равны соответственно

$$k_{\text{И}} = \frac{\Omega_{\text{Н}}^2 k_{\text{Э}}}{k_d U_2}, \quad (2.13)$$

$$k_{\text{П}} = \frac{A_1 \Omega_{\text{Н}} k_{\text{Э}}}{k_d U_2}. \quad (2.14)$$

На рисунке 2.13 представлен переходной процесс контура регулирования напряжения и переходной процесс желаемого полинома (при условии установки на вход аperiodического фильтра).

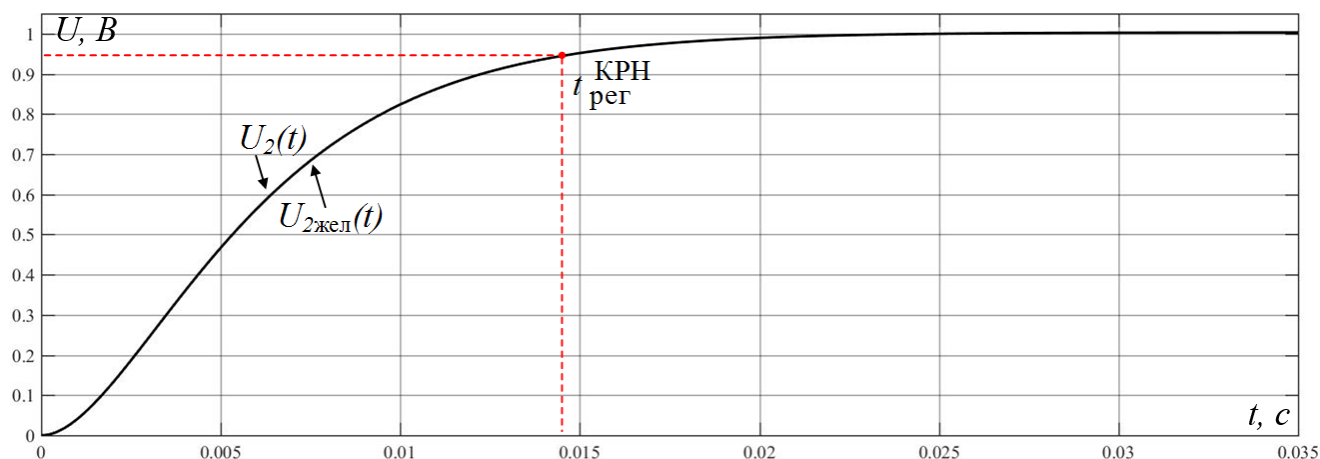


Рисунок 2.13 – Переходной процесс контура регулирования выходного напряжения и желаемого полинома

Переходной процесс выходного напряжения полностью идентичен требуемому, следовательно, контур выходного напряжения работает верно. Переходной процесс выходного напряжения является монотонным, что соответствует биномиальной настройке. Время переходного процесса – 0,0148 с.

На рисунке 2.14 представлены переходные процессы выходного напряжения и относительного угла сдвига между первичным и вторичным напряжением ППТ. ППТ работает в следующем режиме – пуск на номинальное напряжение без

нагрузки, (предварительный заряд первичной и вторичной емкостей уже завершен), ступенчатый наброс номинальной нагрузки, ступенчатый сброс нагрузки. Цифровая модель ППТ и расчетный файл в пакете программ Matlab/Simulink представлены в приложении А.

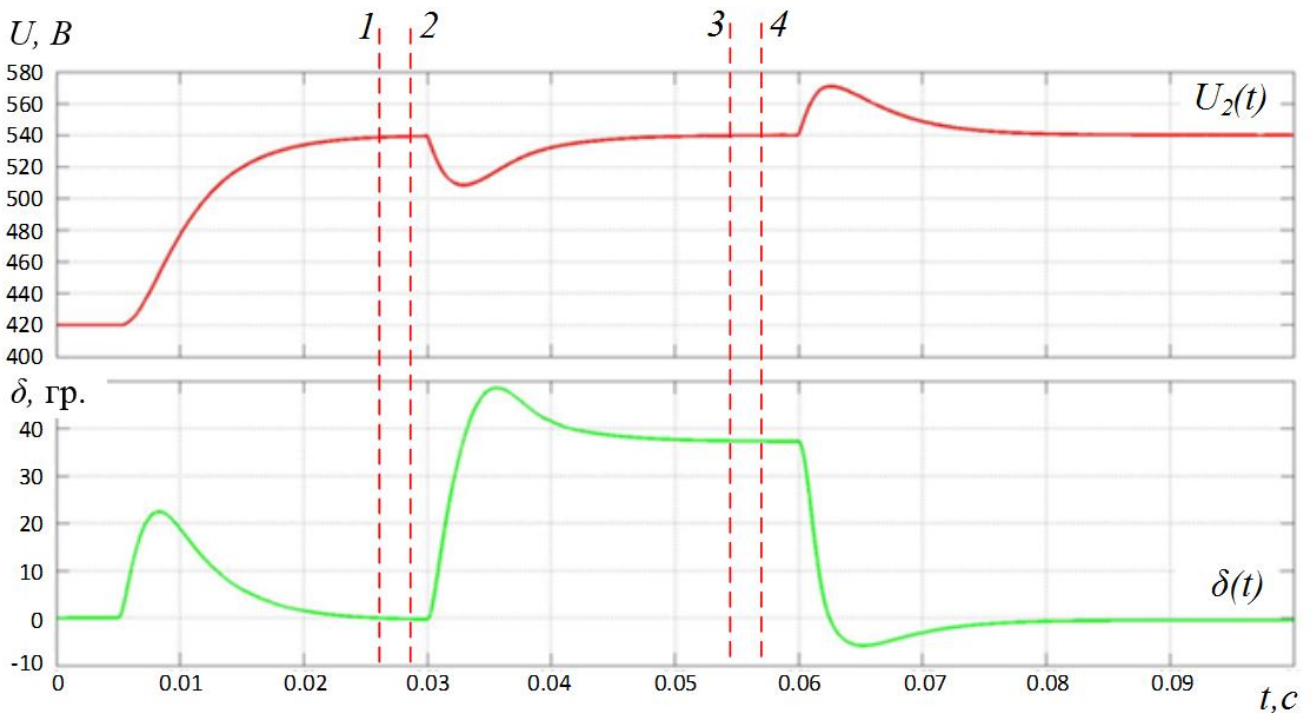


Рисунок 2.14 – Переходные процессы по выходному напряжению и относительному углу сдвига первичного и вторичного напряжений

На рисунке 2.15 представлены переходные процессы выходного тока в различных режимах работы преобразователя (1-2 – холостой ход преобразователя, 3-4 – работа преобразователя с номинальной нагрузкой).

На основании рисунков 2.14 и 2.15 можно сделать вывод, что предлагаемые алгоритмы управления обеспечивают требуемую устойчивость и астатизм ППТ. Время реакции системы автоматического управления на возмущающее воздействие не превышает 10 мс (половины периода напряжения питающей сети переменного тока). Регулирование напряжения ППТ осуществляется плавно, без ударных токов, благодаря чему увеличивается срок службы конденсаторов первичного и вторичного звена постоянного тока.

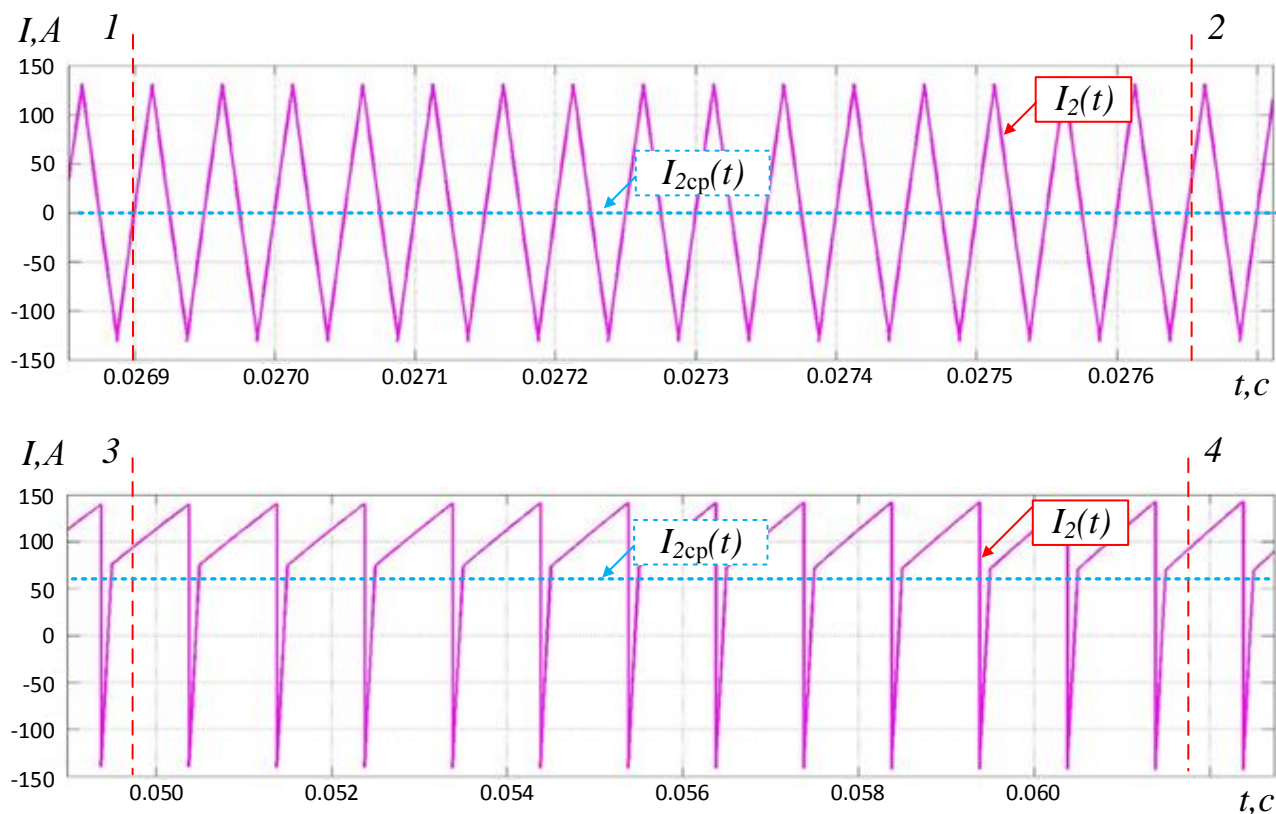


Рисунок 2.15 – Переходные процессы по выходному току ППТ

2.3 Алгоритм работы частотно-регулируемого электропривода двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением

ЭП двойного электропитания (рисунок 1.9) с двунаправленным гальванически развязанным ППТ и СДПМ работает по принципу горячего резервирования с замещением источника питания. Переключение с основной сети (ОС) переменного тока на резервную сеть (РС) постоянного тока и обратно происходит без выпадения СДПМ из синхронизма, что практически не отражается на производительности механизма.

Синхронную работу двух преобразователей (ПЧ и ППТ) и управление коммутационной аппаратуры обеспечивает контроллер верхнего уровня (КВУ), алгоритм работы которого представлен на рисунке 2.16 [34; 35].

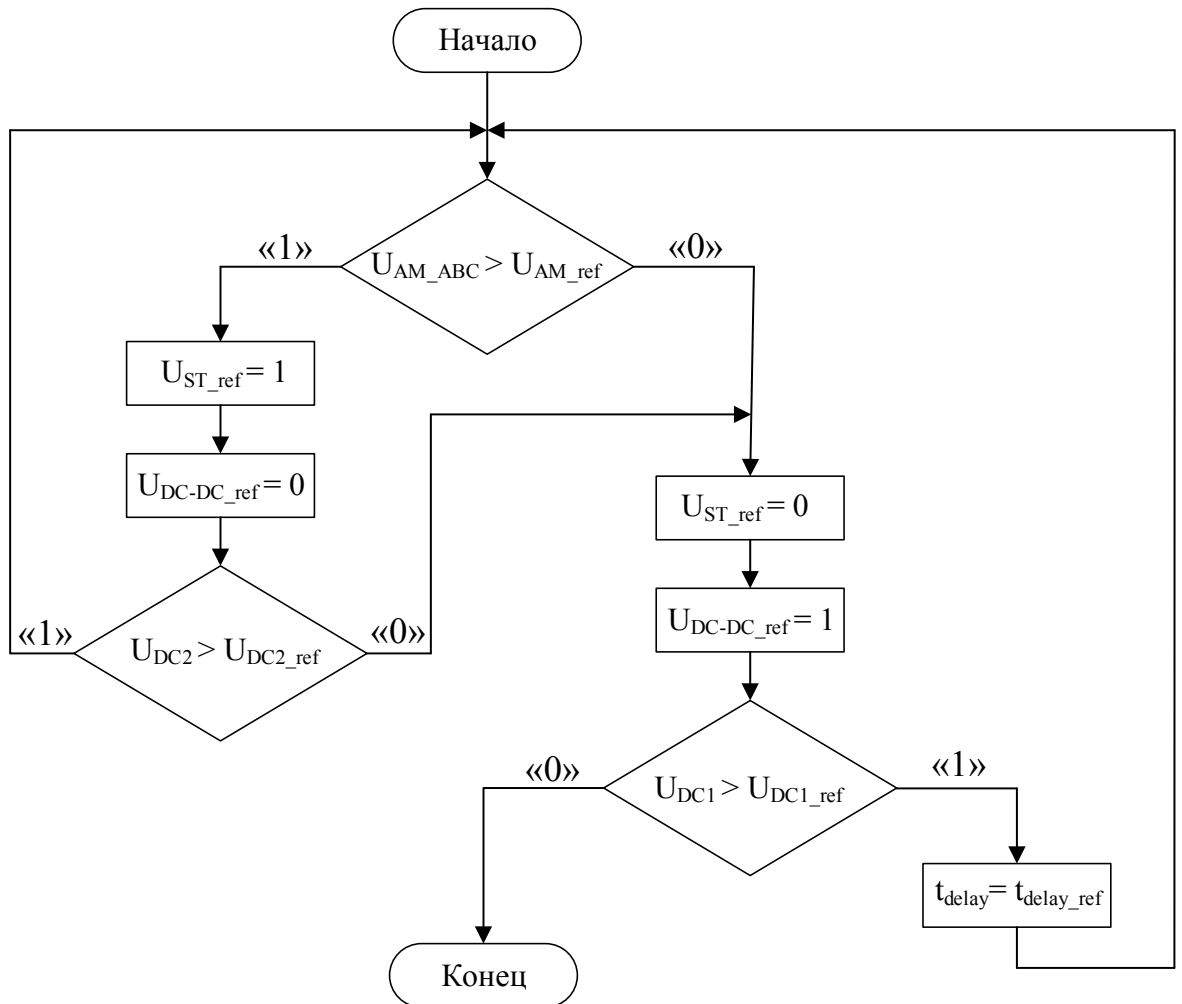


Рисунок 2.16 – Алгоритм работы КВУ частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания

Для реализации принципа горячего резервирования источника электропитания контакторы КМ1 и КМ2 (рисунок 1.9) включены и не участвуют при переключениях питающей сети, а ППТ находится в режиме ожидания или готовности. Работа от резервной сети подразумевается только в аварийных режимах ОС, так как резервный источник существенно ограничен по мощности.

Переключение с ОС на РС возможно по любому из двух условий:

- амплитудное значение любой из питающих фаз ОС (U_{AM_ABC}) стало ниже предельно допустимого значения (U_{AM_ref});
- напряжение звена постоянного тока (U_{DC2}) стало ниже предельно допустимого значения (U_{DC2_ref}).

Обратное переключение с РС на ОС возможно только после полного восстановления основной сети с учетом выдержке времени (t_{delay}), благодаря чему можно ограничить «дребезг» при переключении между питающими сетями.

В таком случаи, аварийная остановка электродвигателя возможна только если ОС неисправна и напряжение РС достигнет предельного минимального значения (U_{DC1_ref}). Эти условия максимально повышают «живучесть» рассматриваемой электромеханической системы.

В качестве исполнительного двигателя, был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). СДПМ имеет минимальные массогабаритные показатели, что делает его особенно привлекательным для применения на автономных объектах. Кроме того, СДПМ имеет ряд преимуществ: высокая перегрузочная способность, высокий коэффициент полезного действия, высокую достижимую частоту вращения и др. К основным недостаткам СДПМ можно отнести: более высокую стоимость относительно АДКЗР, технологические и конструктивные сложности при изготовлении, малый номенклатурный ряд [37].

Для приводов с СДПМ, как правило, используется векторное управление. При этом управляющие воздействия на выходные переменные трехфазного инвертора напряжения – средние за период ШИМ значения фазных токов и напряжений двигателя формируются во вращающейся декартовой системе координат (d, q). При этом классически при управлении СДПМ по оси q задается значение тока, пропорциональное электромагнитному моменту, задание тока по оси d поддерживается равным нулевому значению (данное утверждение справедливо только для неявнополусных синхронных машин). Известно, что ток якоря по продольной оси d можно использовать для энергетической оптимизации режимов работы СДПМ. Структурная схема СДПМ во вращающейся системе координат $d-q$ согласно системе уравнений 2.15 (ориентированной по вектору Ψ_μ) представлена на рисунке 2.17 [56].

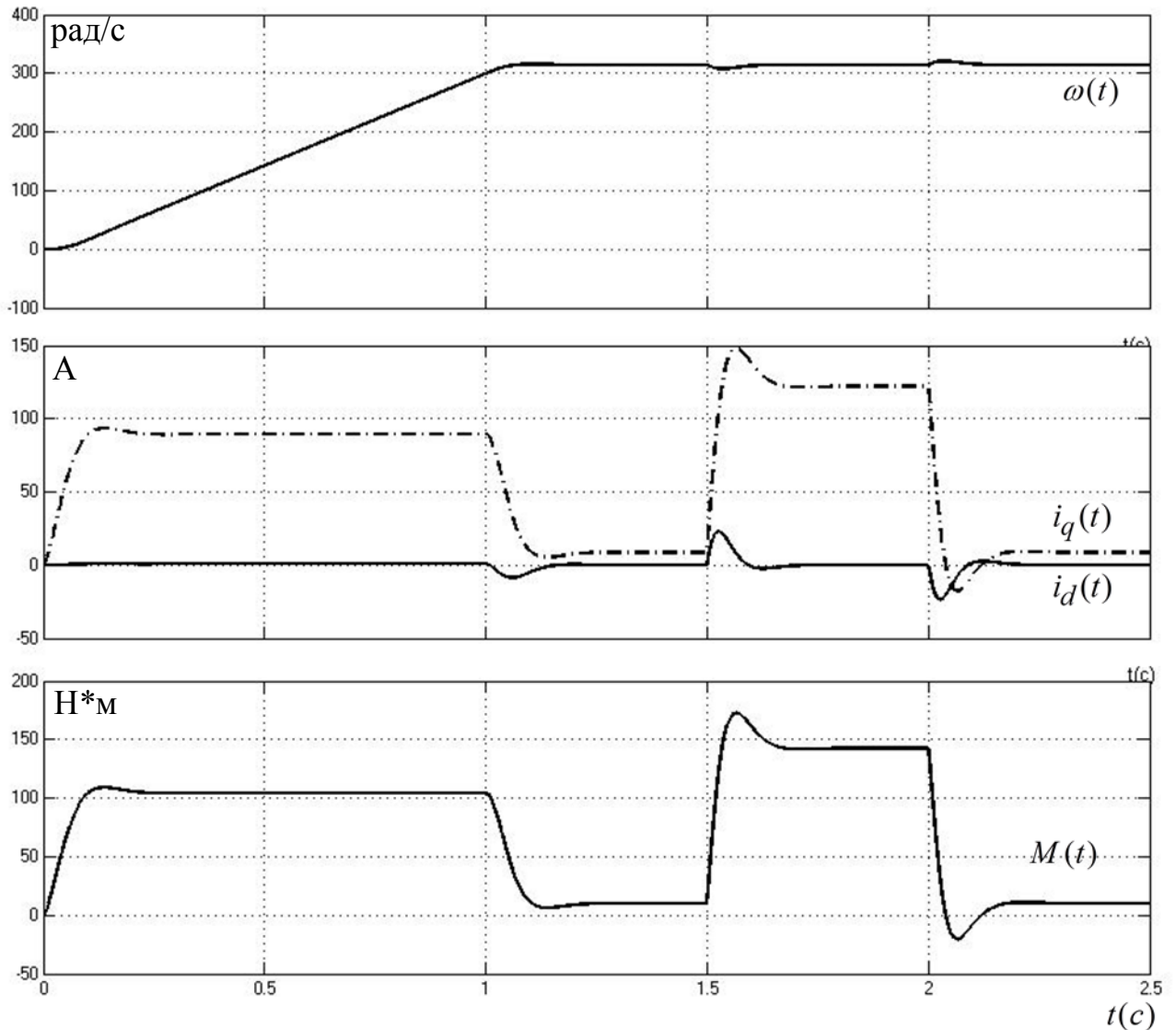


Рисунок 2.18 – Переходные процессы в системе векторного управления СДПМ

Как видно из графиков переходных процессов система векторного управления СДПМ синтезирована верно и обеспечивает требуемые режимы работы ЭП.

На рисунке 2.19 представлены переходные процессы по среднему значению тока в фазе СДПМ, напряжению звена постоянного тока и механической частоте вращения ротора частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания. ЭП отработывает следующие режимы работы – разгон с номинальной нагрузкой на валу, работа на номинальной скорости и номинальной нагрузкой от основной сети, переключение электропитания с ОС на РС, работа на номинальной скорости и

номинальной нагрузкой на валу от резервной сети. Цифровая модель в среде Matlab/Simulink и командный файл представлены в Приложение А.

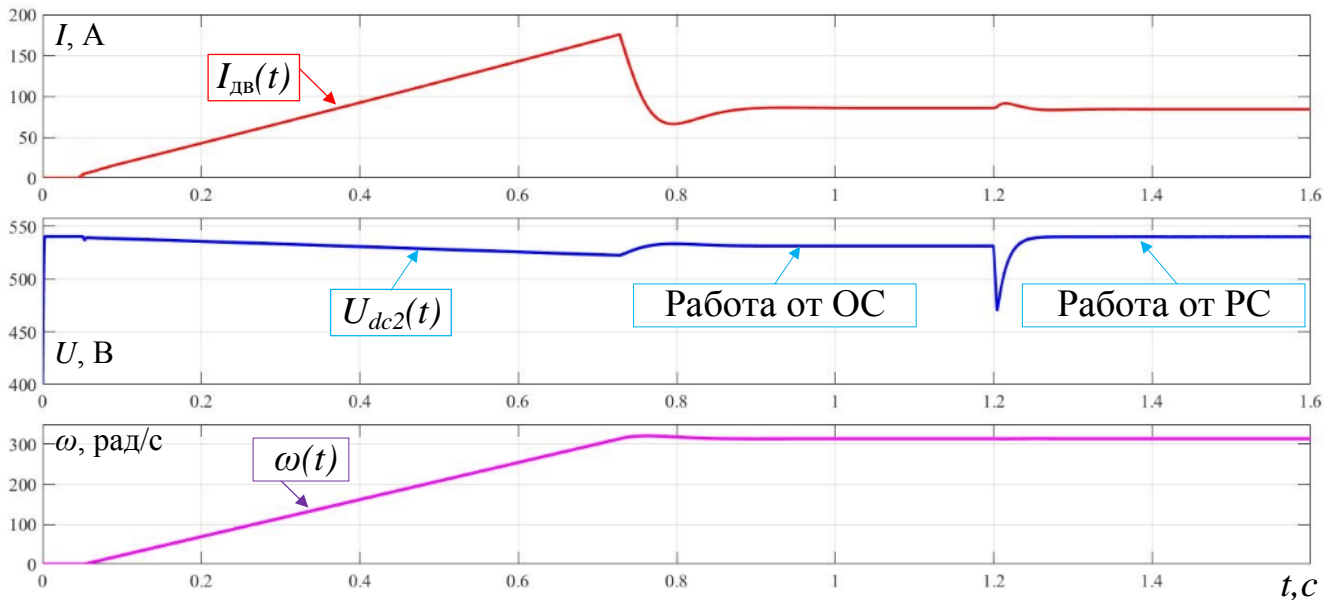


Рисунок 2.19 – Переходные процессы ЭП при переходе питания с основной сети на резервную

Переходные процессы, полученные в результате цифрового моделирования, подтверждают справедливость принятых решений при разработке алгоритма управления ЭП двойного электропитания. Алгоритм обеспечивает работу двух независимых источников электроэнергии по принципу горячего резервирования, благодаря чему СДПМ функционирует без существенной просадки по скорости и не выпадает из синхронизма. Предлагаемая система частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, обладает следующими показателями качества: время переключения электропитания – не более 10 мс, время восстановления напряжения звена постоянного тока – 20 мс, просадка напряжения в звене постоянного тока при переходе – не более 13 %, просадка по скорости СДПМ – менее 1 %.

2.4 Экспериментальные исследования электропривода двойного электропитания с двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока в постоянный и приводным синхронным двигателем с постоянными магнитами

Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории ЗАО «ЭРАСИБ» г. Новосибирск.

Экспериментальная установка ЭП двойного электропитания состоит из стандартного общепромышленного двухзвенного преобразователя мощностью 55 кВт, макета двунаправленного гальванически развязанного ППТ мощностью 60 кВт, коммутационной аппаратуры, контроллера верхнего уровня, машинного каскада синхронного двигателя с постоянными магнитами (55 кВт) и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (55 кВт) (рисунок 2.20).

ППТ состоит из четырех IGBT модулей CM1400DU-24NF (рисунок 2.21 «а») производства компании Mitsubishi Electric. Каждый модуль состоит из двух IGBT транзисторов и двух обратных диодов. Первичное и вторичное звено постоянного тока состоит из набора электролитических конденсаторов В43580-А9338М (рисунок 2.22 «б») производства компании EPCOS AG, соединенных по параллельно-последовательной схеме.



Рисунок 2.20 – Макетный образец ЭП двойного электропитания



«а»

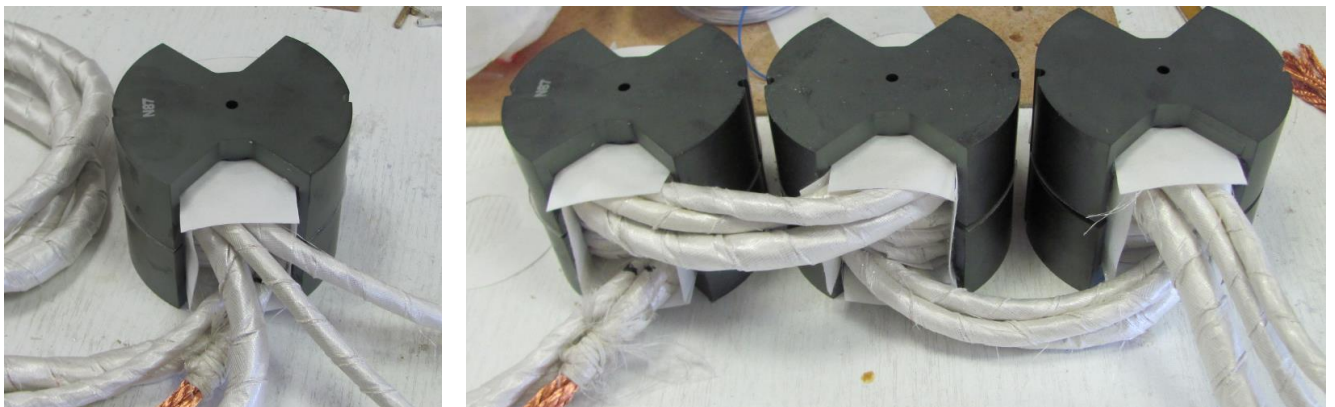


«б»

Рисунок 2.21 – Внешний вид силового транзисторного модуля («а») и силового конденсатора («б») в схеме ППТ

Управление ключами осуществляется при помощи цифрового сигнального процессора MC56F8345VFGE производства компании Freescale, через согласующие платы усиления. Передача управляющего сигнала между контроллером и драйверами транзисторов осуществляется по волоконно-оптическому кабелю. Управление транзисторами с помощью оптических сигналов обеспечивает высокую помехозащищенность и необходимую скорость передачи сигналов [38].

Повышающий трансформатор (рисунок 2.22 «б») и дроссель (рисунок 2.22 «а») необходимо рассчитывать с учетом высокой частоты коммутации из-за влияния поверхностного эффекта (skin effect) [40]. Для устранения поверхностного эффекта обмотки повышающего трансформатора и дросселя следует изготавливать из литцендрата, при этом сердечник изготавливается из магнитомягких материалов, например, феррита. Ферритовый сердечник должен иметь тороидальную конструкцию, что позволяет снизить влияние геометрических факторов на внутренние потери в магнитной системе. Коэффициент трансформации был принят 1:2, что примерно соответствует отношению номинального напряжения ЗПТ ПЧ (540 В) и напряжения при среднем уровне заряда аккумуляторных батарей.



«а»

«б»

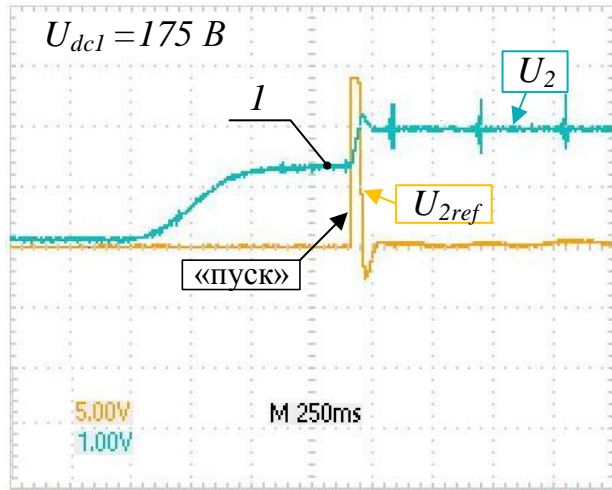
Рисунок 2.22 – Внешний вид дросселя («а») и повышающего трансформатора («б») в схеме ППТ

Двухзвенный ПЧ имеет в составе своей силовой схемы выпрямительный комплект, звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения. Выпрямительный комплект состоит из трех модулей VSKL-105-14 производства Vishay Intertechnology. Каждый модуль представляет собой последовательно соединенный диод и тиристор, последний из которых применяется для плавного предварительного заряда звена постоянного тока. Звено постоянного тока состоит из электролитических конденсаторов B43760A9338M000 производства компании EPCOS AG. Автономный инвертор напряжения состоит из трех модулей 2MBI300VH-120-50 производства Fuji Electric.

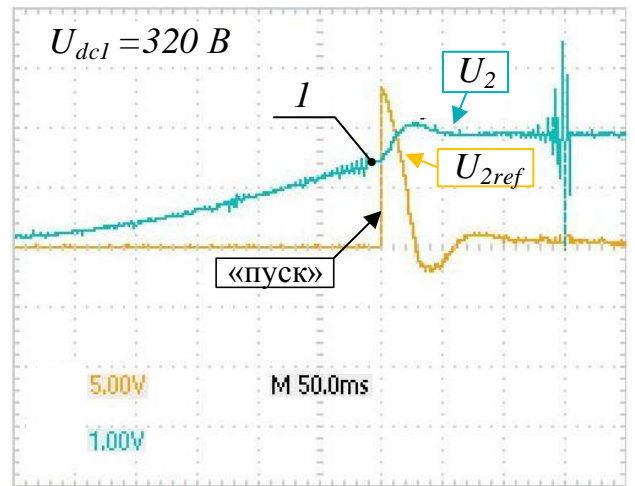
Контроллер верхнего уровня (КВУ) осуществляет совместное управление ППТ и ПЧ. Управление осуществляется по цифровому интерфейсу RS-485. В качестве сетевого протокола используется ModBus RTU [40].

Параметры исследуемого синхронного и нагрузочного асинхронного двигателей представлены в приложение А и Б соответственно.

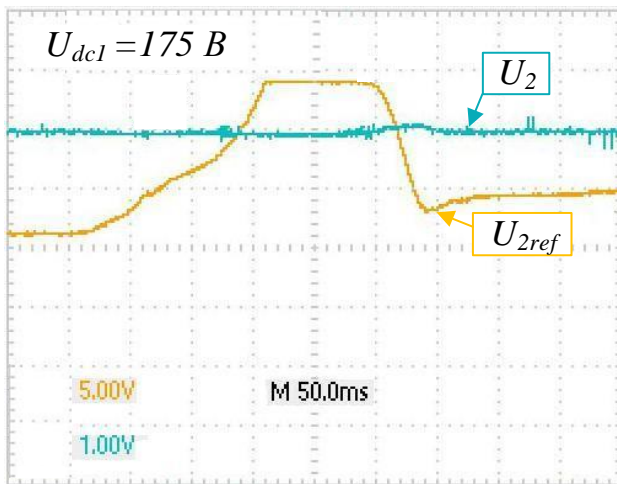
На рисунках 2.23 представлены переходные процессы выходного напряжения (U_2) и сигнала задания на выходное напряжение (U_{2ref}) ППТ, полученные в результате натурного эксперимента при напряжениях резервной сети 175 В и 320 В соответственно. На рисунках 2.23 «а», «б» ППТ работает в режиме пуска на номинальное напряжение, при этом вторичное звено постоянного тока предварительно заряжено до уровня 460 В (точка 1), что соответствует минимально допустимому уровню звена постоянного тока ПЧ. На рисунках 2.23 «в», «г» и 2.23 «д», «е» ППТ работает в режиме наброса и сброса номинальной нагрузки соответственно.



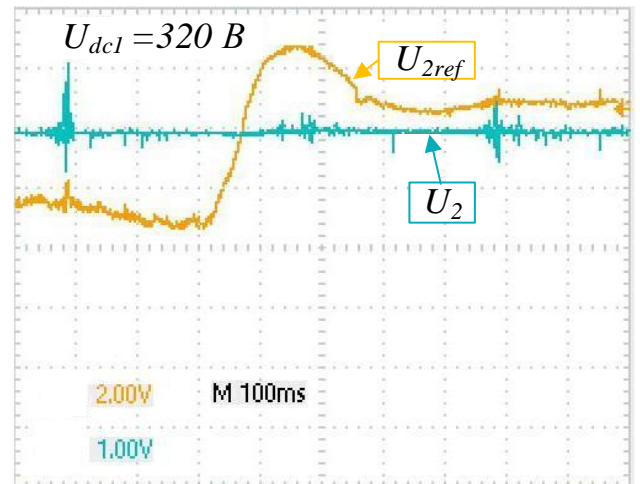
«а»



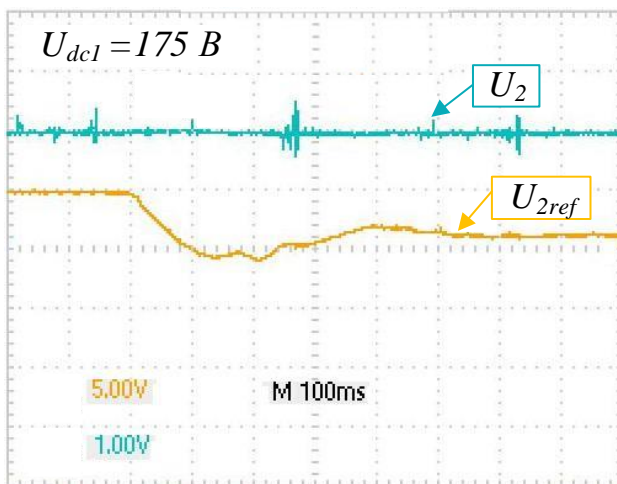
«б»



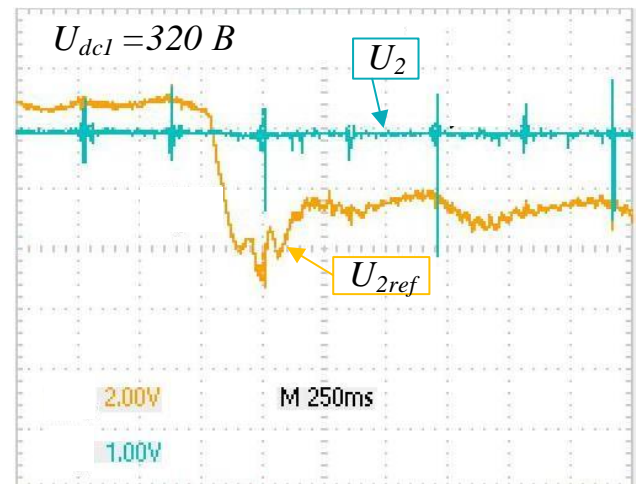
«в»



«г»



«д»



«е»

Рисунок 2.23 – Переходные процессы по выходному напряжению ППТ и сигналу задания на выходное напряжение ППТ, при различных значениях первичного напряжения

На рисунках 2.24 представлены переходные процессы выходного тока ППТ в режимах холостого хода (рисунок 2.24 «а», «б») и в режиме номинальной нагрузки (рисунок 2.24 «в», «г»), полученные в результате натурного эксперимента при напряжениях резервной сети 175 В и 320 В соответственно.

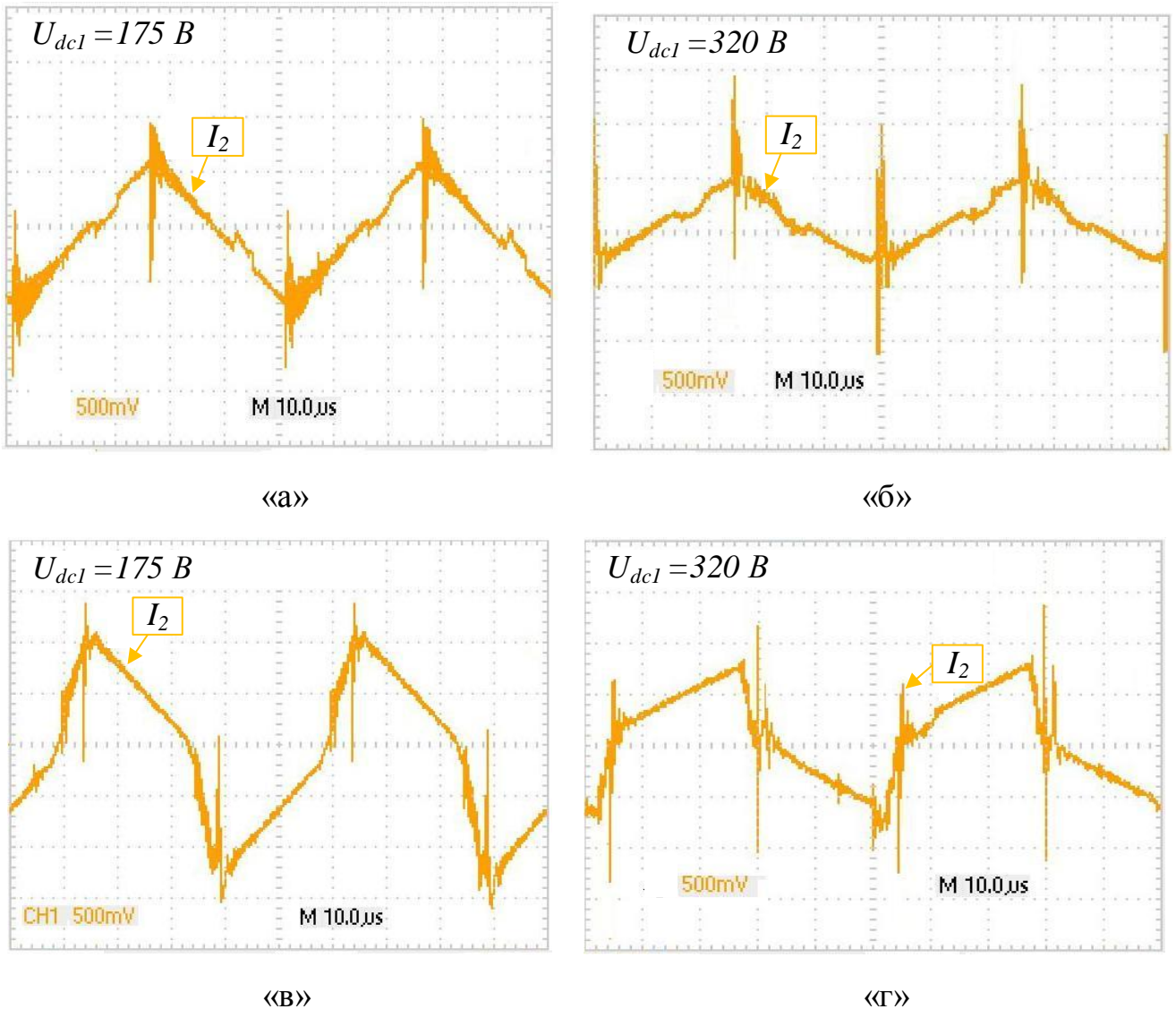


Рисунок 2.24 – Переходные процессы выходного тока ППТ при напряжениях 175 В – 320 В

Переходные процессы по форме и качеству полностью соответствуют переходным процессам, полученным в результате математического расчета и цифрового моделирования. Время переходного процесса выходного напряжения (рисунок 2.21 «б») составляет – 0,016 с (длительность менее одного периода питающего напряжения ОС переменного тока). Провалы вторичного напряжения

при набросе и сбросе номинальной нагрузки составляют – 25-35 В (4,6 – 6,5 % от номинального значения).

На рисунке 2.25 представлен переходной процесс выходного напряжения ППТ или напряжение звена постоянного тока ПЧ в режиме переключения электропитания с ОС на РС, полученный в результате натурального эксперимента. На участке 1-2 частотно-регулируемый ЭП работает от 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.

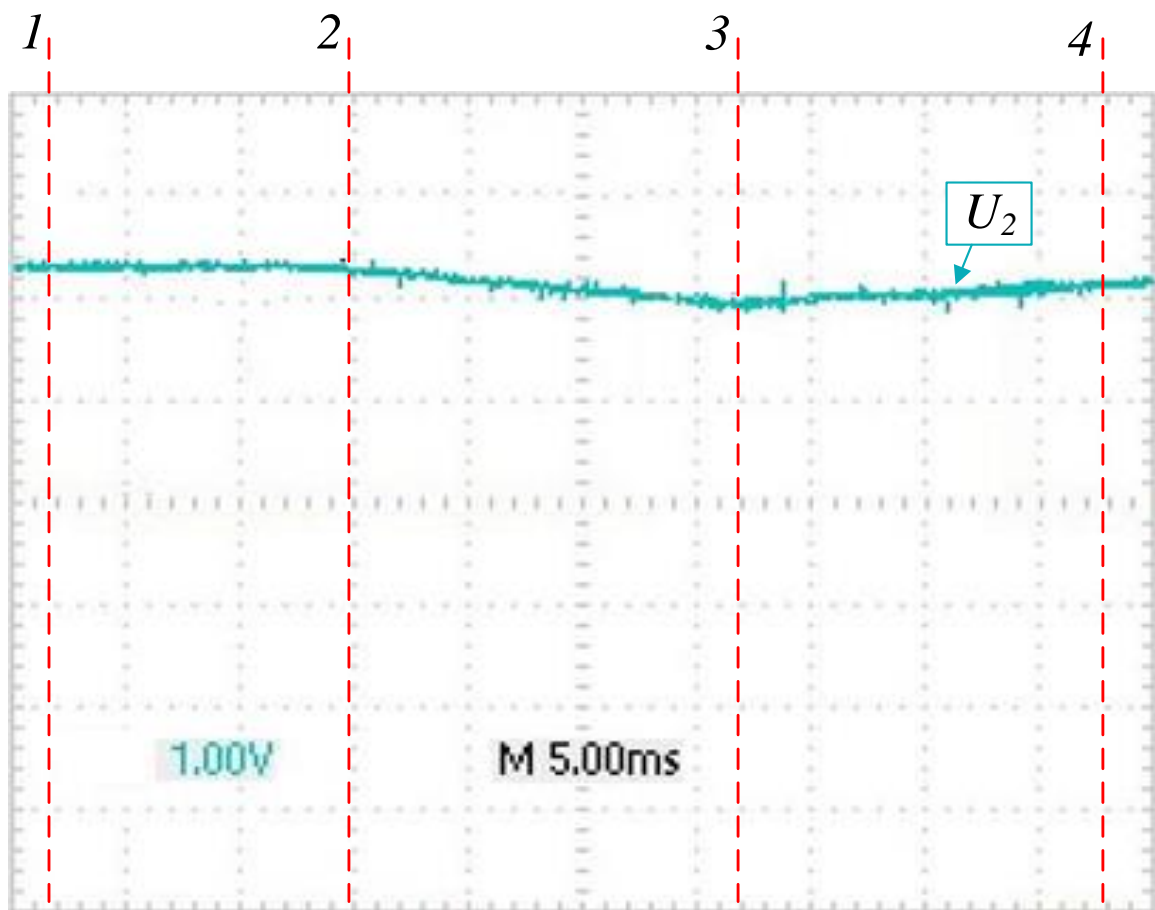


Рисунок 2.25 – Переходной процесс выходного напряжения ППТ в режиме переключения электропитания с ОС на РС

Переходный процесс выходного напряжения ППТ аналогичен переходному процессу, полученному в результате цифрового моделирования. Просадка напряжения составляет – 70 В (13 % от номинального значения). Суммарное время

от отключения ОС до восстановления номинального значения напряжения ЗПТ (участок 2-4) – 33 мс. Время переключения (участок 2-3) составляет – 17 мс. Просадка по механической частоте вращения СДПМ составляет менее 1 %, что обеспечивает работу ЭП без существенной потери производительности в режимах переключения источника электропитания.

Выводы по главе

1. Рассмотрена силовая схема двунаправленного гальванически развязанного ППТ. Приведена схема замещения импульсного трансформатора и его математическая модель в векторно-матричной форме, а также эюры тока и напряжений. Представлен математический вывод и график регулировочной характеристики мощности и тока ППТ при различных входных напряжениях.

2. Разработана система управления двунаправленным гальванически развязанным ППТ на основе принципов подчиненного регулирования координат. Предложен способ линеаризации регулировочной характеристики преобразователя при номинальном режиме работы. Представлен подробный структурно-параметрический синтез контуров регулирования и расчет коэффициентов регуляторов тока и напряжения. Представлены графики переходных процессов контуров регулирования. Время нарастания напряжения в звене постоянного тока ПЧ – 16 мс (длительность менее одного периода питающего напряжения ОС), время реакции ППТ на возмущающее воздействие составляет 10 мс.

3. Предложен алгоритм работы частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, который обеспечивает работу двух независимых электросетей по принципу горячего резервирования с замещением. Рассмотрены алгоритмы векторного управления СДПМ и представлены графики переходных процессов в различных режимах его работы. Представлены графики переходных процессов ЭП двойного электропитания с функцией горячего резервирования основной сети, полученные с помощью цифрового моделирования. Время переключения электропитания – не более 10 мс, время восстановления напряжения звена

постоянного тока в системе ЭП с СДПМ – 20 мс, просадка напряжения в звене постоянного тока при переходе – не более 13 %, просадка по скорости СДПМ – менее 1 %.

4. Рассмотрена проблематика промышленного изготовления ППТ, связанная с высокой частотой коммутации силовых ключей. Даны рекомендации по конструктивным решениям и комплектующим ППТ. Представлены осциллограммы переходных процессов напряжений и токов ППТ при разных уровнях напряжения резервной сети, полученные в результате натурального эксперимента. Результаты экспериментального исследования полностью подтверждают результаты цифрового моделирования. Время переключения нагрузки с ОС на РС напряжения в звене постоянного тока ПЧ при аварии ОС – 17 мс (длительность менее одного периода питающего напряжения ОС), время восстановления напряжения в звене постоянного тока ПЧ – 33 мс (отличия от результатов моделирования связано с принятыми стандартными допущениями при составлении цифровой модели), просадка напряжения в звене постоянного тока ПЧ – 13 % от номинального значения, просадка угловой частоты вращения СДПМ менее 1%.

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ

3.1 Силовая схема и принцип работы повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный

Повышающий преобразователь постоянного тока (ПППТ) имеет ряд преимуществ относительно преобразователя, выполненного по схеме с гальванической развязкой [41]. В частности, силовая схема имеет более простую структуру, упрощенные алгоритмы управления и меньшие массогабаритные показатели при той же эквивалентной мощности. На рисунке 3.1 представлена силовая схема повышающего преобразователя постоянного тока.

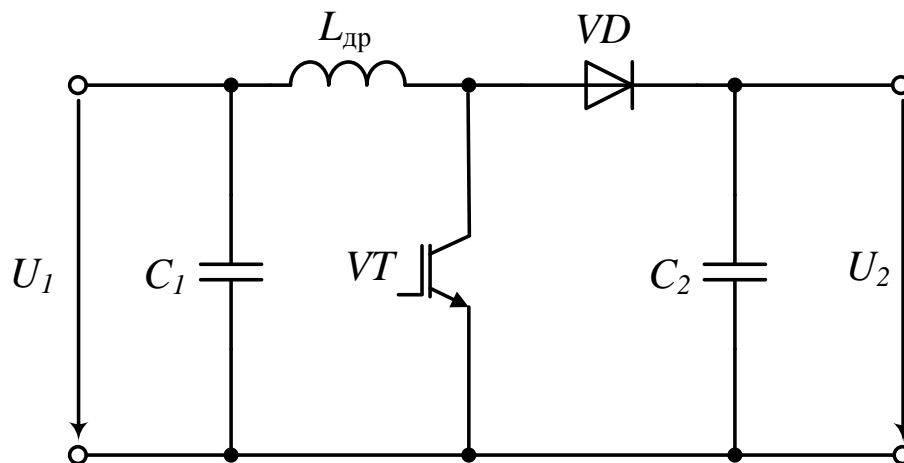


Рисунок 3.1 – Электрическая схема силовой части ПППТ

На рисунке 3.1 были приняты следующие обозначения: $L_{др}$ – дроссель; VD – диод; VT – IGBT транзистор; C_1 – звено постоянного тока входной цепи (ЗПТ); C_2 – звено постоянного тока выходной цепи; U_1 – входное напряжение; U_2 – выходное напряжение.

Управление преобразователем осуществляется посредством транзистора (VT) в режиме широтно-импульсной модуляции. Частота коммутации транзистора может варьироваться от 2-20 кГц. Высокая частота коммутации позволяет

существенно снизить массогабаритные показатели дросселя, при этом его конструкция должна быть рассчитана на токи с высокой частотой.

Работу ПППТ можно разделить на три временных интервала за один период коммутации VT (рисунок 3.2):

– Первый интервал времени (t_1). Транзистор (VT) открыт, при этом дроссель ($L_{др}$) включен накоротко между плюсом и минусом входного звена постоянного тока (C_1). Параметры силовой схемы выбираются исходя из максимально допустимого тока (I_{Lmax}), который имеет следующую зависимость

$$I_{Lmax} = \frac{U_1 t_1}{L_{др}}. \quad (3.1)$$

– Второй интервал времени (t_2). Транзистор (VT) закрыт, при этом накопленный ток в дросселе заряжает выходное звено постоянного тока (C_2), протекая через диод (VD).

– Третий интервал времени (t_3). Режим бестоковая пауза, при этом обратное протекание тока от выходного ЗПТ к входному ЗПТ отсекается диодом (VD).

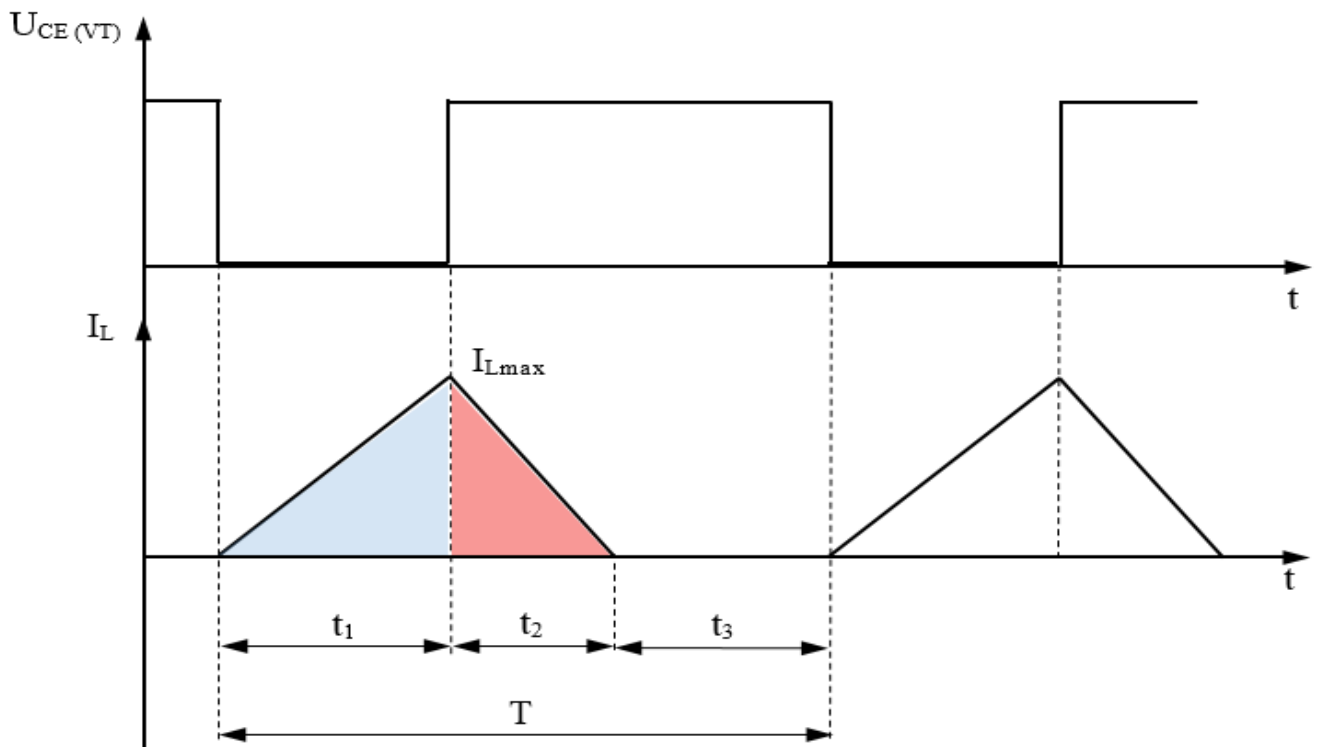


Рисунок 3.2 – Эмпоры тока и напряжения ПППТ

Регулировочная характеристика тока без учета влияния «мертвого времени», активного сопротивления дросселя, а также падений напряжения на полупроводниковых приборах ПППТ [42]

$$I_L = \frac{U_1^2}{2(U_2 - U_1)fL_{др}} \gamma^2, \quad (3.2)$$

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

Регулировочная характеристика выходной мощности ПППТ

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_1^2 U_2}{2(U_2 - U_1)fL_{др}} \gamma^2. \quad (3.3)$$

Регулировочные характеристики выходного тока и выходной мощности ПППТ справедливы только для режима прерывистого тока. Поскольку, в режиме непрерывного тока (I_L не успевает обратиться в ноль за период коммутации транзистора VT) все характеристики разрабатываемого ПППТ существенно нелинейны и неаналитичны. Данную особенность преобразователя необходимо учесть при синтезе системы автоматического управления.

На рисунках 3.3 представлены регулировочные характеристики тока и выходной мощности ПППТ при следующих параметрах силовой схемы: $U_1 = 175 \dots 320$ В; $U_2 = 540$ В; $f = 6$ кГц; $L_{др} = 10$ мкГн.

Выходной ток (I_{max}) и соответственно выходная мощность (P_{max}) ПППТ ограничены максимально допустимым током силового модуля. Регулировочная характеристика согласно выражению 3.2 приведена только для режима прерывистого тока, следовательно, максимальную скважность (γ_{max}) ПППТ следует ограничивать. Диапазон скважности ПППТ $\gamma \in [0, 1 - \frac{t_2}{T}]$.

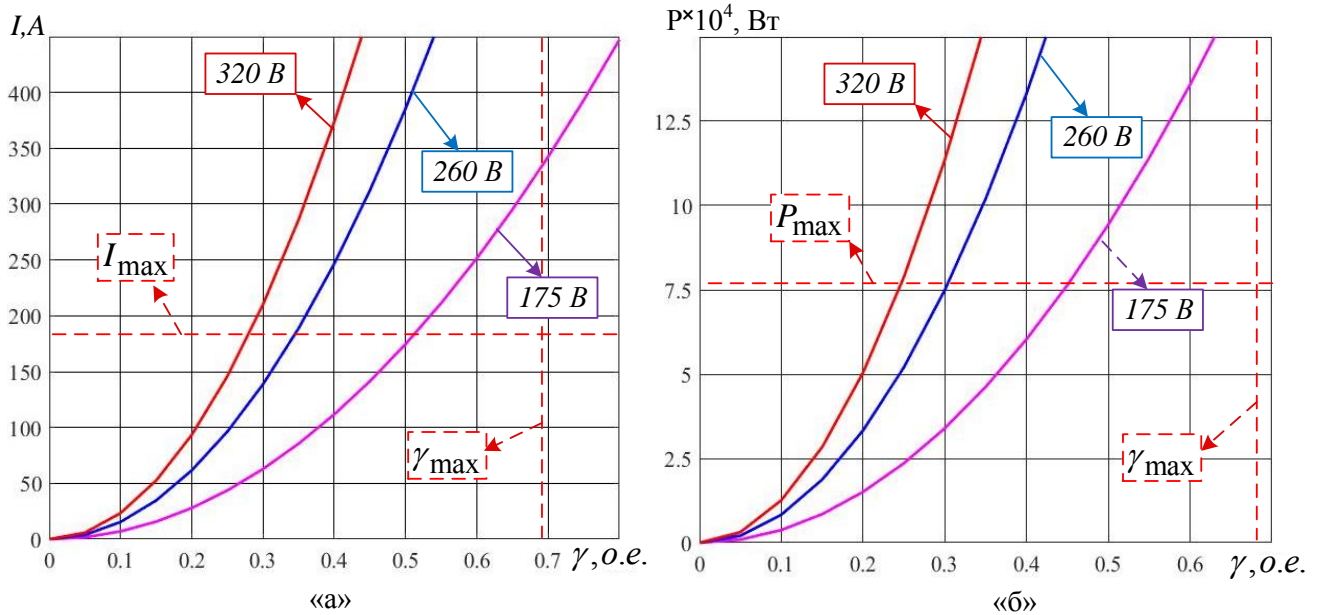


Рисунок 3.3 – Регулировочные характеристики ПППТ при различных значениях входного напряжения: «а» – зависимость тока нагрузки от скважности управляющих импульсов; «б» – зависимость выходной мощности от скважности управляющих импульсов

Структура системы управления ПППТ (рисунок 3.4) практически аналогична системе управления двунаправленным ППТ. Силовая часть преобразователя была эквивалентирована безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_d . Данное допущение справедливо, так как полоса пропускания контура тока более чем в 20 раз меньше частоты дискретизации ПППТ. Линеаризация проводилась в точке при номинальных значениях тока и скважности управляющих импульсов.

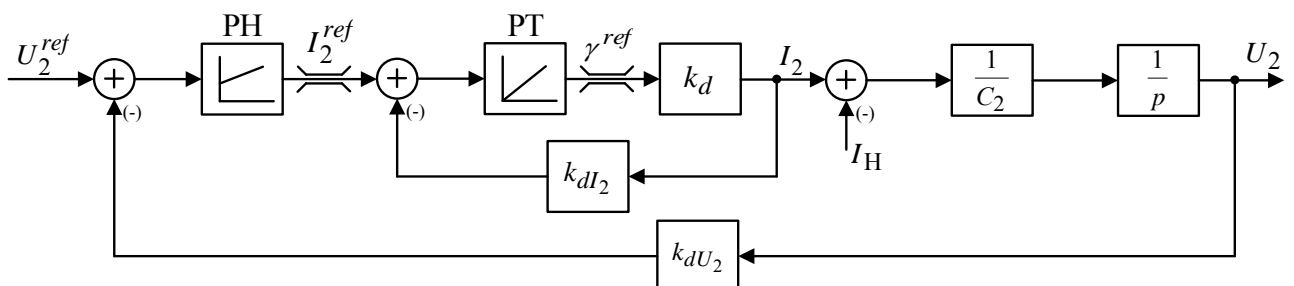


Рисунок 3.4 – Структурная схема системы управления ПППТ

Структурная схема системы управления ПППТ состоит из двух контуров: внешний регулирует выходное напряжение ПППТ или напряжение звена постоянного тока АИН; внутренний подчиненный контур регулирует выходной ток. Для устойчивой работы системы управления в целом, собственные частоты контуров разнесены согласно условию разделения движений [43].

Расчет коэффициентов системы управления выполняются аналогично коэффициентам системы управления двунаправленного преобразователя постоянного тока.

Интегральный коэффициент регулятора тока

$$k_{\text{и}} = \frac{\Omega_{\text{жел}}}{k_d k_{dI_2}}, \quad (3.3)$$

где $\Omega_{\text{жел}}$ – желаемое быстродействие КРТ; k_{dI_2} – коэффициент обратной связи по выходному току.

На рисунке 3.5 представлен график переходных процессов выходного тока ПППТ, при подаче на его вход единичного ступенчатого воздействия.

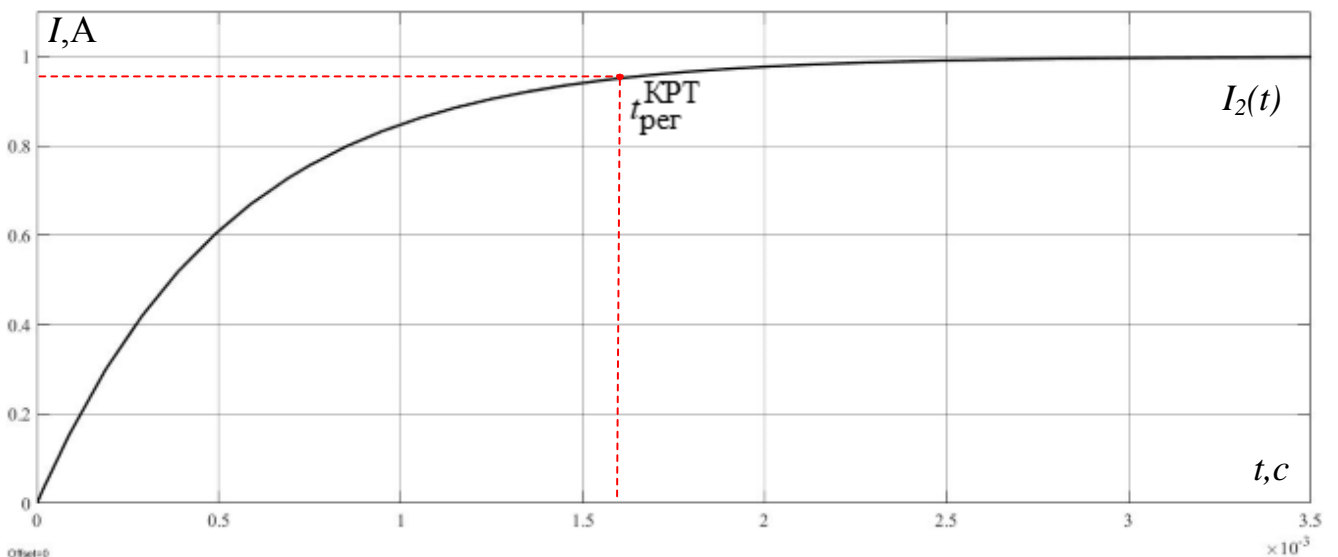


Рисунок 3.5 – Переходной процесс контура регулирования тока ПППТ

Время переходного процесса составляет $t_{\text{пер}}^{\text{КРТ}} = 1,589 \cdot 10^{-3}$ с, что соответствует трем постоянным времени. Следовательно, динамика КРТ ПППТ соответствует желаемым результатам.

Коэффициенты интегральной и пропорциональной части регулятора напряжения

$$k_{\text{И}} = \frac{\Omega_{\text{Н}}^2 k_{\text{Э}}}{k dU_2}, \quad (3.4)$$

$$k_{\text{П}} = \frac{A_1 \Omega_{\text{Н}} k_{\text{Э}}}{k dU_2}. \quad (3.5)$$

На рисунке 3.6 представлен переходной процесс контура регулирования выходного напряжения и переходной процесс желаемого полинома (при условии установки на вход апериодического фильтра). Переходной процесс выходного напряжения полностью идентичен требуемому, следовательно, контур выходного напряжения работает верно. Переходной процесс выходного напряжения является монотонным, что соответствует биномиальной настройке. Время переходного процесса контура напряжения – 0,0876 с.

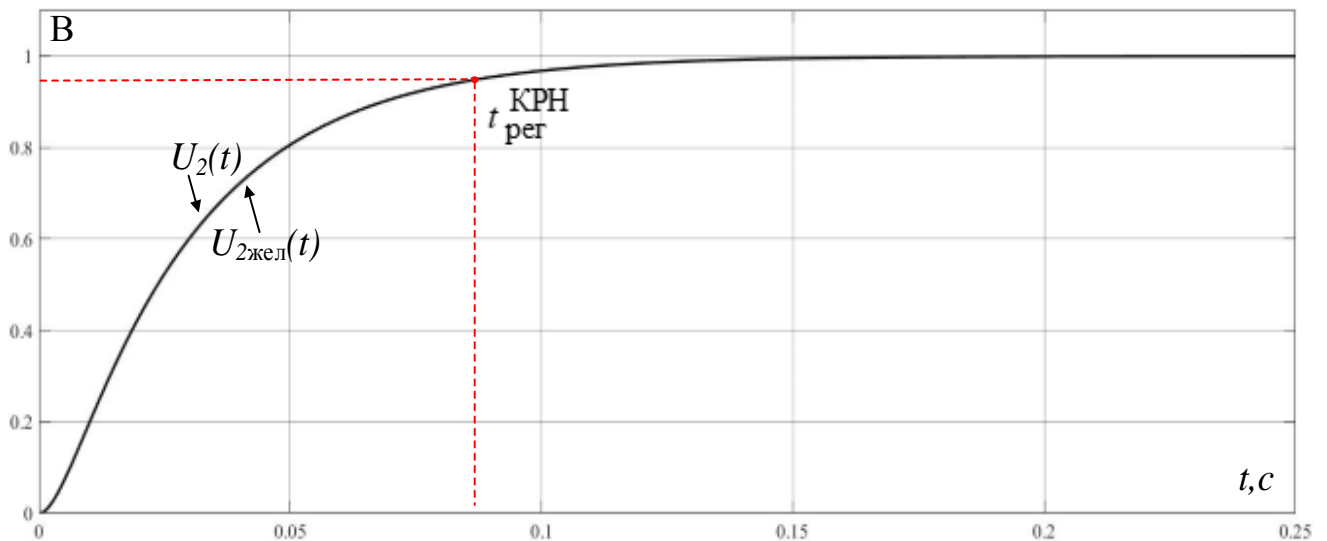


Рисунок 3.6 – Переходной процесс контура регулирования выходного напряжения ПППТ и желаемого полинома

Имитационная модель и программный файл ПППТ в пакете программ Matlab с использованием библиотек Simulink, SimPowerSystems представлена в Приложении Б. На рисунке 3.7 представлен переходной процесс выходного напряжения ПППТ. Преобразователь работает в следующем режиме – пуск на номинальное напряжение под номинальной нагрузкой с учетом предварительного заряда входной и выходной емкостей. Форма выходного тока и коммутационной функции на интервале t_1 - t_2 представлена на рисунке 3.8.

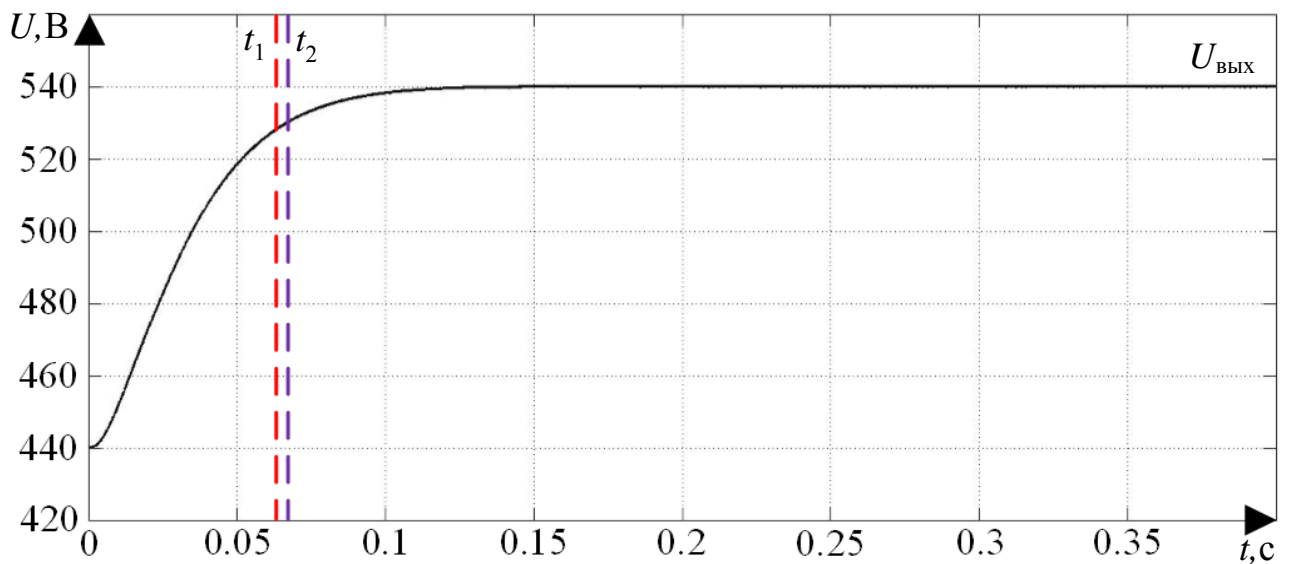


Рисунок 3.7 – Переходной процесс по выходному напряжению ПППТ

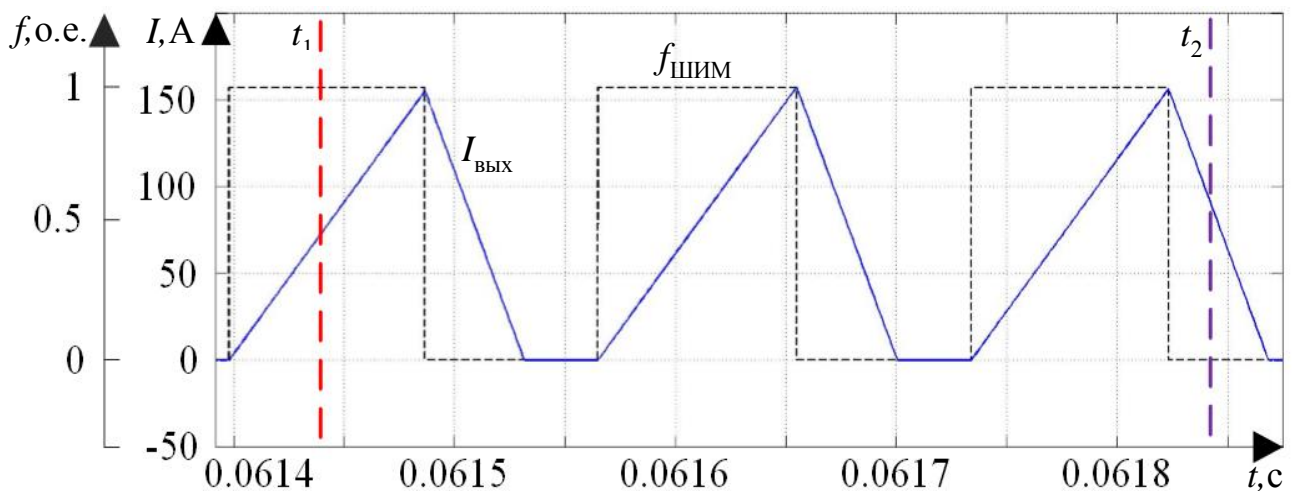


Рисунок 3.8 – Переходной процесс по выходному току и коммутационная функция ПППТ

На основании рисунков (3.7) и (3.8) можно сделать вывод, что предлагаемые алгоритмы управления обеспечивают требуемую устойчивость ПППТ при его работе в номинальном режиме. Время полного восстановления выходного напряжения не превышает 100 мс (пять периодов напряжения основной питающей сети переменного тока).

3.2 Алгоритмы работы асинхронного электропривода от преобразователя частоты с двойным электропитанием

При работе ЭП от системы двойного электропитания необходимо обеспечить гальваническую развязку двух независимых источников питания. При использовании ПППТ гальваническая развязка обеспечивается коммутационной аппаратурой или контакторами (КМ1, КМ2) (рисунок 1.9), которые работают попеременно и с задержкой по времени на включение. Суммарное время переключения с основной сети на резервную сеть или обратно может составлять от 0,5 с до 3 с.

С другой стороны, алгоритмы управления стандартного ПЧ не подразумевают работы в режимах с кратковременными пропажами питающей сети. На рисунке 3.9 показаны переходные процессы по напряжению ЗПТ стандартного двухзвенного ПЧ и частоте вращения АДКЗР мощностью 55 кВт при отключении трехфазной питающей сети (основной сети). АДКЗР работает с номинальной «вентиляторной» нагрузкой на валу. В точке 1 происходит отключение питания ПЧ (аварийный режим). В точке 2 уровень напряжения ЗПТ достигает минимального предельно-допустимого значения (460 В), ПЧ сигнализирует аварию, АДКЗР переходит в режим самовыбега. В точке 3 происходит полная остановка электродвигателя. При отключении питания уровень напряжения ЗПТ достигает аварийного значения за время 20 мс. Время останова электродвигателя под действием нагрузки составляет 2,2 с.

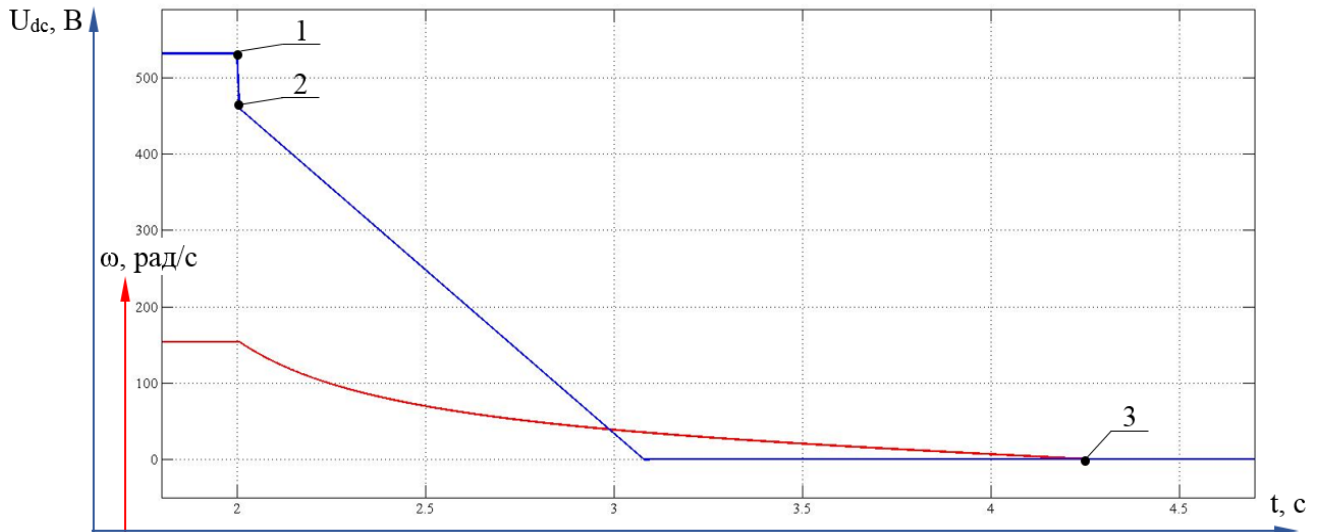


Рисунок 3.9 – Переходные процессы по напряжению ЗПТ (U_{dc}) ПЧ и частоте вращения (ω) АДКЗР при отключении основной сети

Работа стандартной системы частотно-регулируемого ЭП при переключениях питающих сетей возможна только с остановом электродвигателя или по принципу холодного резервирования с замещением. Работа системы по принципу теплого резервирования с замещением источника электропитания при переключениях питающих сетей возможна, однако требует дополнить систему управления новым алгоритмом. В диссертации назовем его безударным рекуперативным алгоритмом [44].

За основу принципов работы безударного рекуперативного алгоритма был принят алгоритм векторного управления АДКЗР [45]. Структура системы управления построена по принципу подчиненного регулирования координат, с внешними контурами регулирования скорости и модуля вектора потокосцеплений ротора, и внутренними контурами регулирования токов статора по продольной (d) и поперечной (q) оси. 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. Структурная схема бездатчикового ЭП с АДКЗР и векторной системой управления представлена на рисунке 3.10.

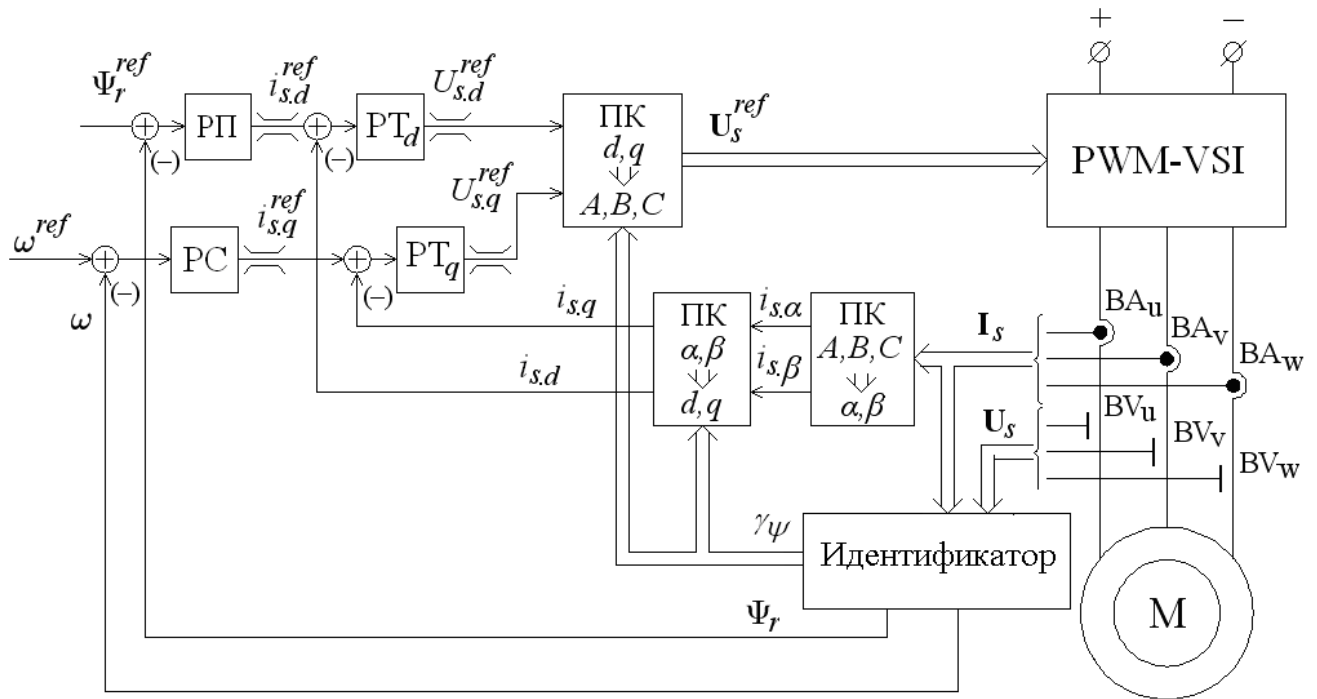


Рисунок 3.10 – Структурная схема исследуемого асинхронного ЭП с векторным управлением

На рисунке 3.10 приняты следующие обозначения: M – асинхронный двигатель; BA – датчики фазных токов; BV – датчики фазных напряжений; $PWM-VSI$ – автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией; PT_d, PT_q – регуляторы токов статора по осям d, q ; $ПП$ – регулятор модуля вектора потокосцеплений ротора; PC – регулятор скорости; $ПК$ – преобразователи координат.

Для определения текущей скорости в бездатчиковом ЭП могут применяться различные идентификаторы: наблюдатель полного порядка, наблюдатель пониженного порядка, метод сигнальной адаптивной обратной модели (САОМ) и др.[46-48].

Уравнения математической модели АДКЗР в скалярной форме записи в декартовой вращающейся системе координат (d, q) , ориентированной по вектору потокосцеплений ротора

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\sigma e}^s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \omega_\psi L_{\sigma e}^s i_{sq} + u_{sd}, \\ L_{\sigma e}^s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega_\psi \left(L_{\sigma e}^s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \psi_r \right) + u_{sq}, \\ \frac{d\psi_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \psi_r, \\ 0 = \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - (\omega_\psi - \omega_e) \psi_r, \\ \frac{d\gamma_\psi}{dt} = \omega_\psi, \\ M_e = c \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq}, \end{array} \right. \quad (3.6)$$

где L_s , L_r – полные индуктивности обмоток статора и ротора соответственно; L_m – взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора; $L_{\sigma e}^s = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r}$ – эквивалентная индуктивность рассеяния АДКЗР, приведенная к статору; R_r – активное сопротивление статора; $\psi_r = \|\Psi_r\|$ – евклидова норма (модуль) вектора потокосцеплений ротора; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени цепи ротора АДКЗР; M_e – электромагнитный момент машины.

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 3.11 представлена блок-схема разработанного безударного рекуперативного алгоритма, который строится на основе алгоритма «бестоковой паузы» [44] и дополняется необходимым условием рекуперации кинетической энергии.

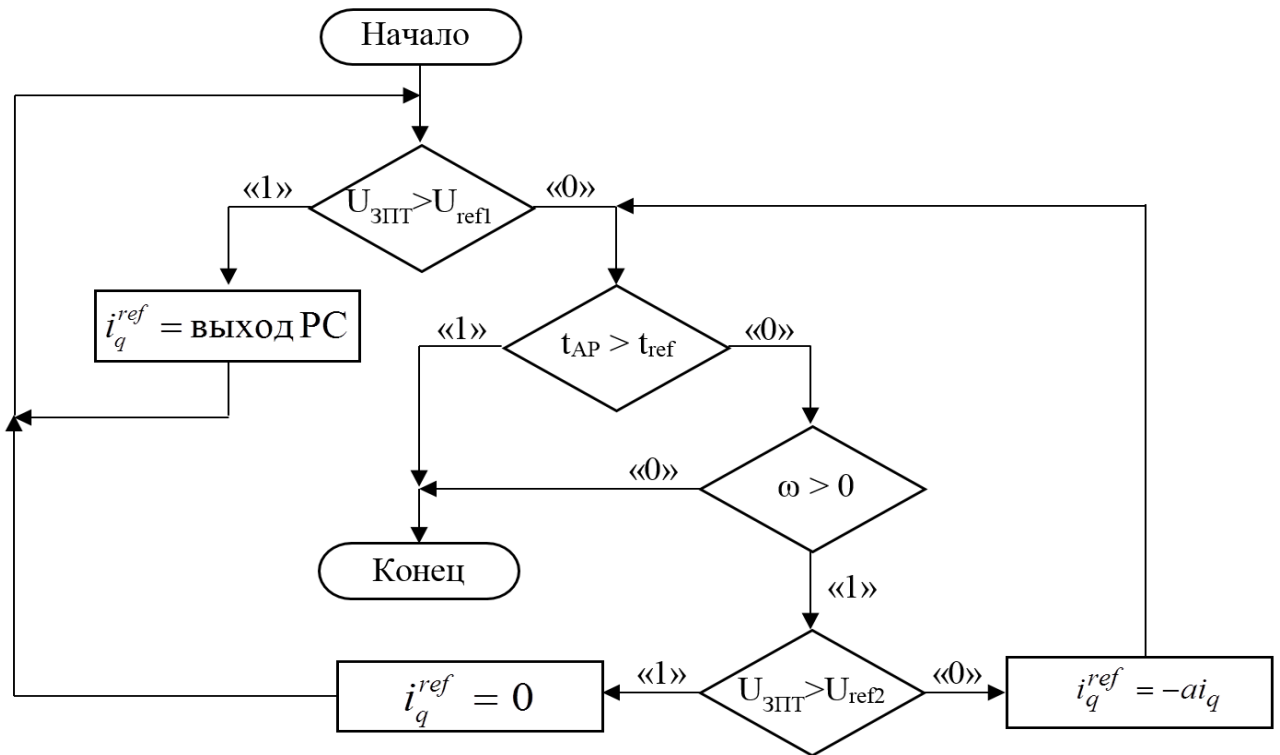


Рисунок 3.11 – Блок-схема безударного рекуперативного алгоритма

На рисунке 3.11 приняты следующие обозначения: $U_{\text{ЗПТ}}$ – напряжение звена постоянного тока; $t_{\text{АП}}$ – время нахождения в аварийном режиме; t_{ref} – уставка времени работы алгоритма; i_q^{ref} – задание на моментобразующий ток; U_{ref1} – уставка по напряжению ЗПТ для включения алгоритма управления; U_{ref2} – уставка по напряжению ЗПТ для начала формирования генераторного момента; a – задание величины рекуперативного моментобразующего тока, в процентах от номинального.

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 (см. рисунок 3.10).

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 потокосцеплений ротора работает в штатном (до аварийном) режиме.

Для рассматриваемых режимов работы ЭП, система уравнений (3.6) примет вид:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd}, \\ u_{sq} = L_{\sigma}^s e i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \psi_r, \\ M_e = 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Полная потребляемая мощность электродвигателя, в аварийном режиме работы равна:

$$S_{Д} = \sqrt{(u_{sd} i_{sd})^2 + (u_{sq} i_{sq})^2} = R_s i_{sd}^2. \quad (3.8)$$

Суммарное потребление мощности системой «преобразователь – двигатель»:

$$S_{ПЧ-Д} = S_{Д} + S_{СУ} + S_{КСК} + S_{К} + S_{Ф}, \quad (3.9)$$

где $S_{СУ}$ – полная потребляемая мощность системой управления ПЧ; $S_{КСК}$ – полная мощность, расходуемая на коммутационные потери в силовых ключах; $S_{К}$ – суммарные потери в кабельной линии; $S_{Ф}$ – потери в выходном фильтре при его наличии.

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 , другими словами формируется генераторный момент, в процентах от номинального значения (параметр a , на рисунке 3.11). Разработанный алгоритм управления позволяет преобразовывать кинетическую энергию механизма в электрическую, тем самым поддерживая уровень напряжения ЗПТ в пределах допустимого

значения. Длительность режима рекуперации ограничено уставкой времени (t_{ref}), которая задает условие максимального времени работы в аварийном режиме и естественным снижением кинетической энергии вследствие торможения механизма.

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.

Для исследования разработанного алгоритма управления используется цифровая модель с параметрами АДКЗР мощностью 55 кВт и эквивалентный по мощности ПЧ (Приложение Б). На рисунке 3.12 представлены переходные процессы по напряжению ЗПТ, частоте вращения и электромагнитному моменту АДКЗР при работе безударного рекуперативного алгоритма управления. Электродвигатель работает с номинальным моментом на валу. Тип нагрузки: 10 % – момент сухого трения; 90 % – «вентиляторная» нагрузка. Момент инерции – $1,1 \cdot J_{дв}$.

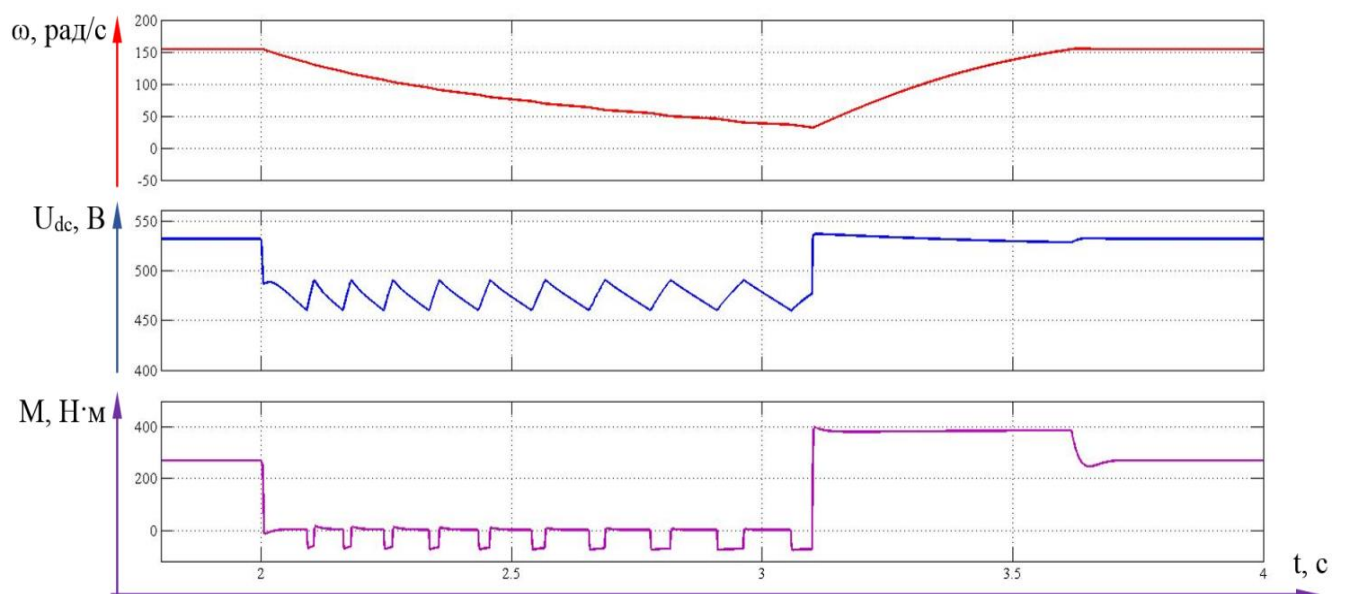


Рисунок 3.12 – Переходные процессы при работе «безударного рекуперативного» алгоритма управления АДКЗР

Основной задачей «безударного рекуперативного» алгоритма является обеспечение максимальной длительности работы ПЧ при исчезновении входного питающего напряжения. При этом значение частоты вращения АДКЗР уменьшается незначительно, по сравнению с неконтролируемым режимом самовыбега. На рисунке 3.13 представлены переходные процессы по частоте вращения вала двигателя: 1 – режим самовыбега; 2 – работа «безударного рекуперативного» алгоритма управления с 10 % величиной тормозного тока; 3 – работа «безударного рекуперативного» алгоритма управления с 90 % тормозным током.

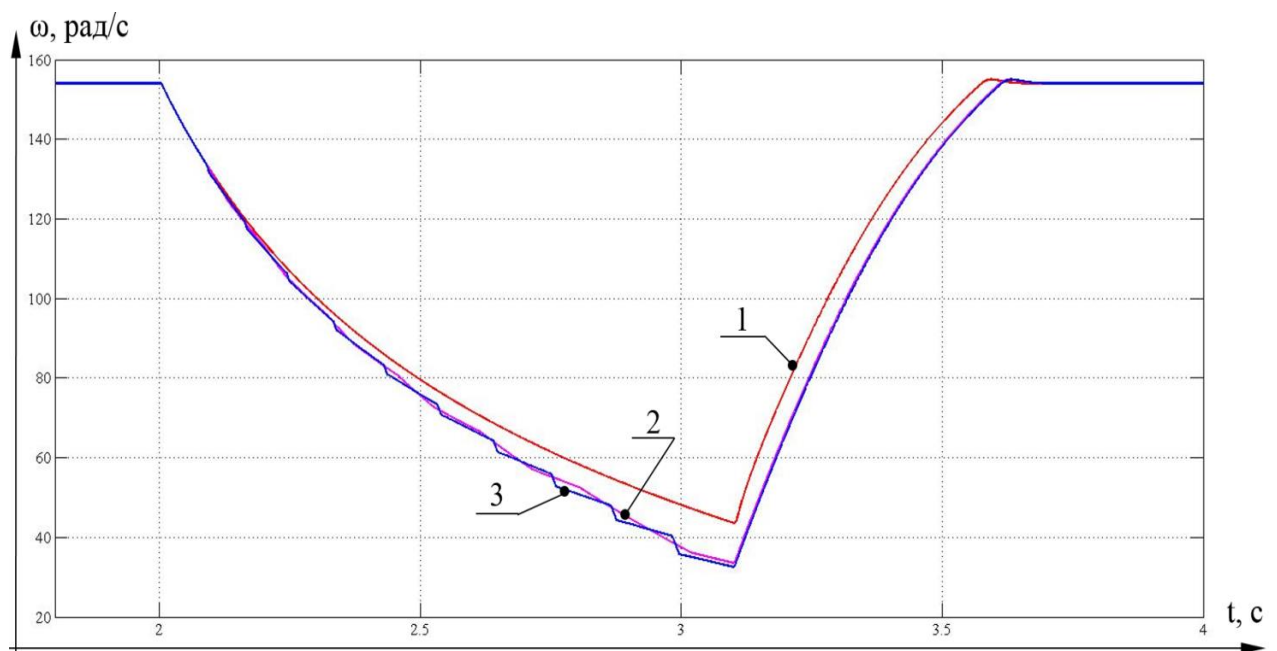


Рисунок 3.13 – Переходные процессы по скорости при различных способах реакции системы управления на возникновение аварийного режима

Темп снижения скорости при работе «безударного рекуперативного» алгоритма управления не зависит от величины задания на тормозной ток, т.к. с увеличением тормозного момента пропорционально уменьшается время работы рассматриваемого алгоритма. Формировать максимальный генераторный момент нет необходимости, следовательно, можно существенно ограничить динамические перегрузки на механические узлы электропривода, задавая тормозной ток 10...15 % от номинального значения. Разница в скоростях при работе в режиме

рекуперативного торможения относительно процесса самовыбега электродвигателя, при прочих равных условиях, составляет 6,5 %.

На рисунке 3.14 представлены переходные процессы по частоте вращения вала двигателя с различными механическими инерционностями: 1 – $1,1 \cdot J_{\text{ДВ}}$; 2 – $2 \cdot J_{\text{ДВ}}$; 3 – $5 \cdot J_{\text{ДВ}}$; 4 – $10 \cdot J_{\text{ДВ}}$.

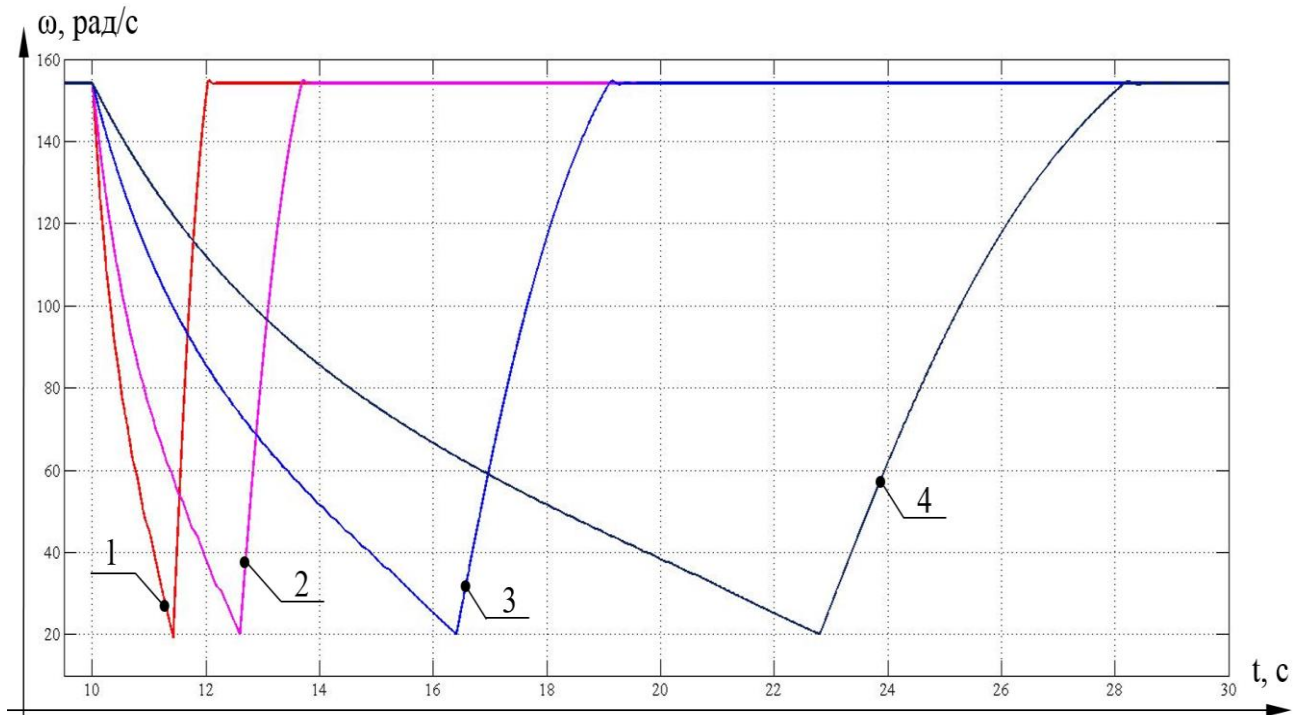


Рисунок 3.14 – Переходные процессы по скорости с различными механическими инерционностями

Очевидно, что максимальное время работы в аварийном режиме увеличивается с увеличением инерционности системы. Разработанный алгоритм наилучшим образом подходит для систем с большим моментом инерции и «вентиляторным» характером нагрузки. К подобным производственным механизмам можно отнести мощные вентиляторы, насосы, турбины и конвейеры. Применение «безударного рекуперативного» алгоритма в ЭП, время естественного останова которых под нагрузкой менее секунды так же оправдано, если речь идет о питании ЭП от «плохой сети» (кратковременные провалы напряжения, несимметричность действующих значений фаз, присутствие наложенного напряжения в гармоническом составе питающей сети).

На рисунке 3.15 представлены переходные процессы напряжения звена постоянного тока и механической частоты вращения ротора асинхронного двигателя, который работает в системе двойного электропитания. ЭП отработывает следующие режимы:

– Участок 1-2. Разгон АДКЗР до номинальной скорости с номинальной нагрузкой «вентиляторного» типа от основной сети. ПППТ находится в режиме готовности. Контактёр КМ1 – включен, КМ2 – выключен (рисунок 1.8).

– 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 – включен). ПППТ стабилизирует звено постоянного тока ПЧ от резервного источника.

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

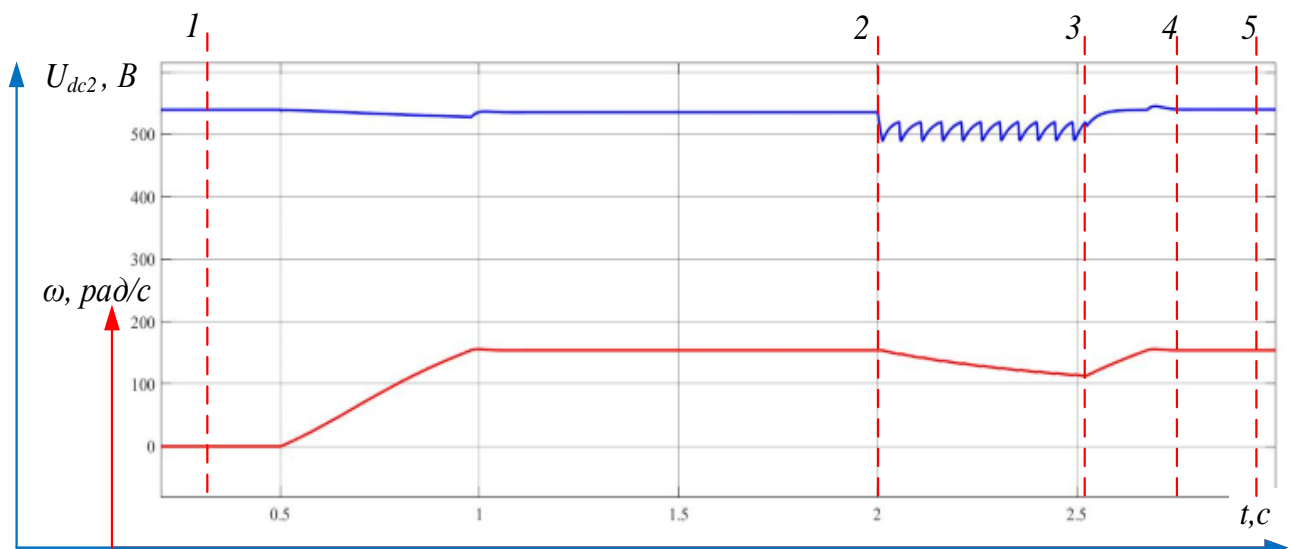


Рисунок 3.15 – Переходные процессы по напряжению звена постоянного тока ПЧ и механической частоте вращения ротора АДКЗР в режиме переключения источника электропитания

Применение «безударного рекуперативного» алгоритма и повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный обеспечивает работу электропривода двойного электропитания при переключениях электропитания с основной сети на резервную и обратно без остановки АДКЗР. Работа основной и резервной сети организована согласно принципам «теплого» резервирования с замещением. Время полного восстановления работоспособности электропривода (временной интервал 2-4) составляет – 0,75 с, динамическая просадка скорости – 27 %.

3.3 Экспериментальные исследования электропривода двойного электропитания с повышающим преобразователем постоянного тока в постоянный и приводным асинхронным электродвигателем

Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории ЗАО «ЭРАСИБ» г. Новосибирск.

Обобщенная электрическая схема испытательного стенда представлена на рисунке 3.16.

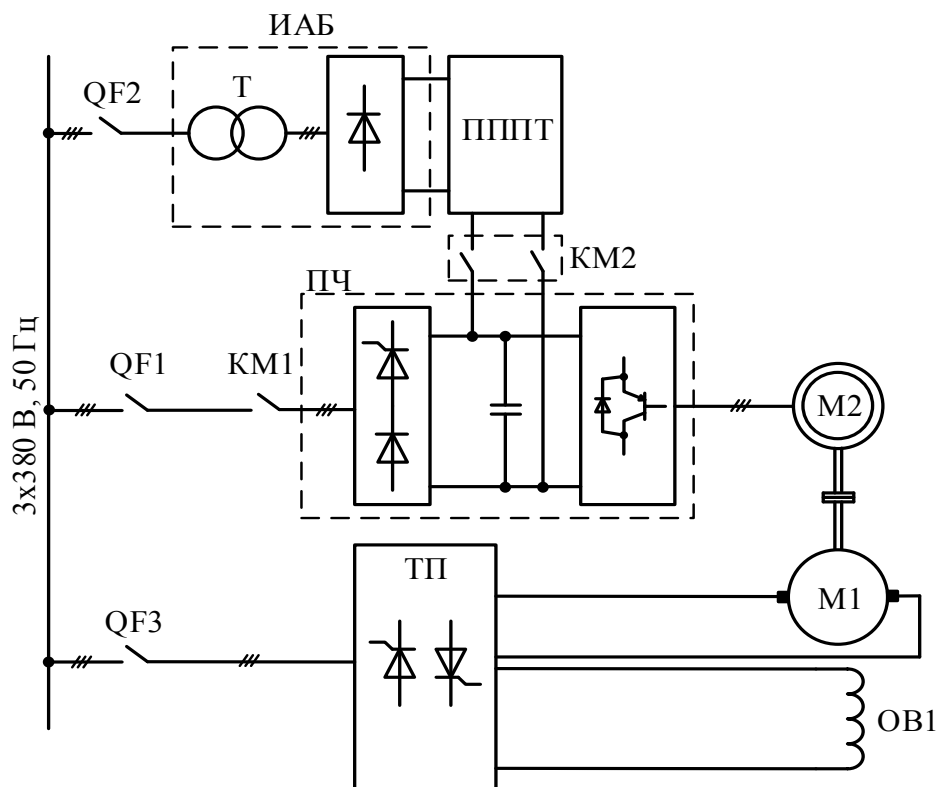


Рисунок 3.16 – Обобщенная электрическая схема испытательного стенда

Стенд состоит из имитатора аккумуляторной батареи (ИАБ); макета повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный (ПППТ); двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ); электромашинного каскада (М1, М2); реверсивного тиристорного преобразователя постоянного тока (ТП); коммутационной (КМ) и защитной аппаратуры (QF). Данный стенд позволяет рекуперировать энергию в питающую сеть, благодаря чему существенно сокращается энергопотребление, которое равно сумме всех потерь в преобразователях и электрических машинах.

Имитатор аккумуляторной батареи состоит из автотрансформатора типа РНТ и неуправляемого диодного выпрямителя. Линейное напряжение регулируется в диапазоне от 120 В до 230 В, благодаря чему на выходе диодного выпрямителя формируется требуемое напряжение постоянного тока 175-320 В.

Электромашинный каскад (рисунок 3.17) состоит из асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором марки АИР225М4 (55 кВт, 1500 об/мин) и электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением марки 2ПН250МУХЛ4 (55 кВт, 1500 об/мин). Электродвигатели установлены на общую платформу и имеют жесткое соединение валов через муфту.



Рисунок 3.17 – Электромашинный каскад АДКЗР и ДПТ НВ

Тиристорный преобразователь постоянного тока представляет собой 6-ти пульсный реверсивный управляемый выпрямитель для питания якорной цепи и 6-ти пульсный нереверсивный неуправляемый выпрямитель для питания обмотки возбуждения. Система управления тиристорного преобразователя работает в режиме стабилизации момента. Энергия, полученная от двигателя постоянного тока, передается обратно в питающую сеть.

Макетный образец повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный мощностью 40 кВт представлен на рисунке 3.18.

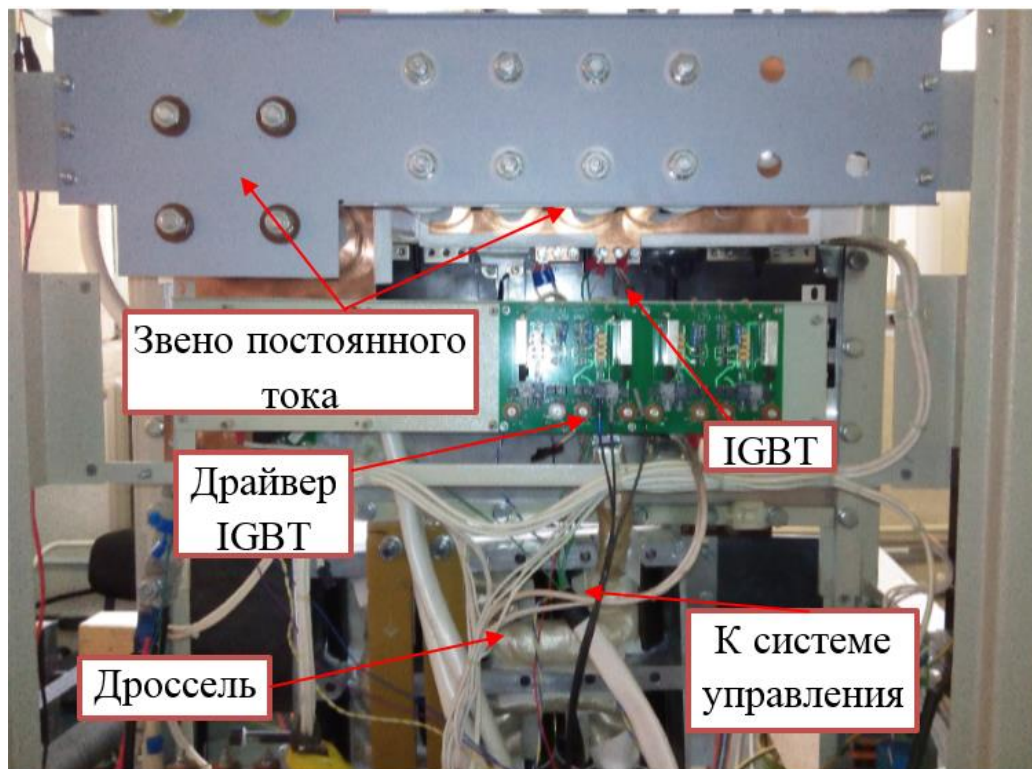


Рисунок 3.18 – Макетный образец ПППТ мощностью 40 кВт

Силовая полупроводниковая часть макетам повышающего преобразователя постоянного тока построена на базе модульного транзистора CM1400DU-24NF и модульного диода MD/T3-540-18-A. Подложка модулей зафиксирована на алюминиевом радиаторе с принудительным воздушным охлаждением.

Для снижения потерь в дросселе его сердечник имеет тороидальную конструкцию и изготавливается из феррита, а проводник представляет собой многожильный провод (литцендрат).

В основе системы управления лежит микропроцессор Freescale (MC56F8345VFGE). В целях безопасности ПППТ оборудован аппаратными и программными защитами: от превышения максимального допустимого тока, от повышенного или пониженного напряжения питания, от перегрева и др.

На рисунках 3.19 представлены переходные процессы по выходному напряжению ПППТ (рисунок 3.19 «а»), выходному току и коммутационная функция ПППТ (рисунок 3.19 «б»), полученные при натурном эксперименте. Переходные процессы получены при учете предварительного заряда выходных и выходных звеньев постоянного тока. В качестве нагрузки используется блок резисторов, номинал которых подобран исходя из номинального тока ПППТ.

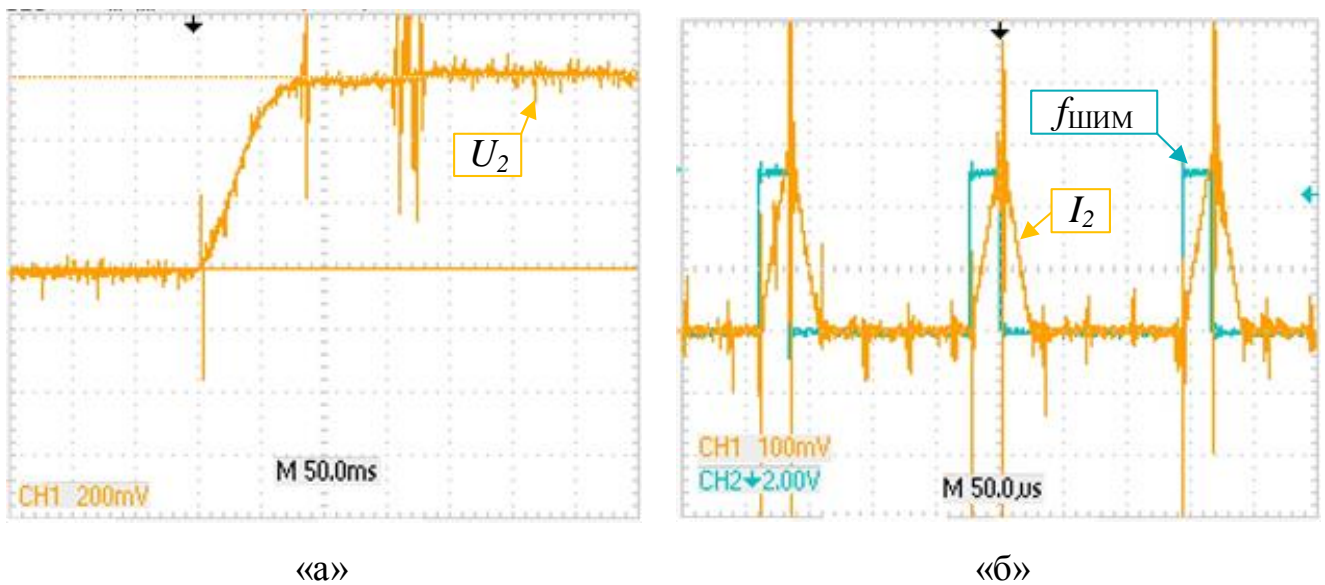


Рисунок 3.19 – Переходные процессы по: «а» – выходному напряжению ПППТ; «б» – выходному току и коммутационная функция ПППТ

Переходные процессы, полученные в результате натурного эксперимента, полностью идентичны по форме и качеству переходным процессам, полученным с помощью цифровых моделей (рисунки 3.6, 3.8). Время полного восстановления выходного напряжения (рисунок 3.19 «а») составляет порядка 100 мс. Форма переходного процесса соответствует желаемому полиному, имеющему биномиальную настройку, т.е. переходной процесс монотонный без перерегулирования.

На рисунке 3.20 представлены переходные процессы по оценке механической частоты вращения ротора и напряжения звена постоянного тока ПЧ в режиме переключения электропитания (рисунок 3.16). Испытательный стенд работает в следующем режиме работы:

– Участок 1-2 работа от основной сети переменного тока. Питание звена постоянного тока осуществляется от штатного выпрямителя ПЧ. Контактор КМ1 замкнут, а контактор КМ2 разомкнут. АДКЗР работает с номинальной нагрузкой на валу.

– Участок 2-3 отключение контактора КМ1. Запускается таймер на выдержку времени на включение контактора КМ2. ПЧ работает в аварийном режиме, согласно принципам «безударно рекуперативного» алгоритма.

– Участок 3-4 включение КМ2 и резервной сети, формируемой ПППТ.

– Участок 4-5 восстановление номинального напряжения звена постоянного тока ПЧ. АДКЗР работает в штатном режиме от резервной электросети.

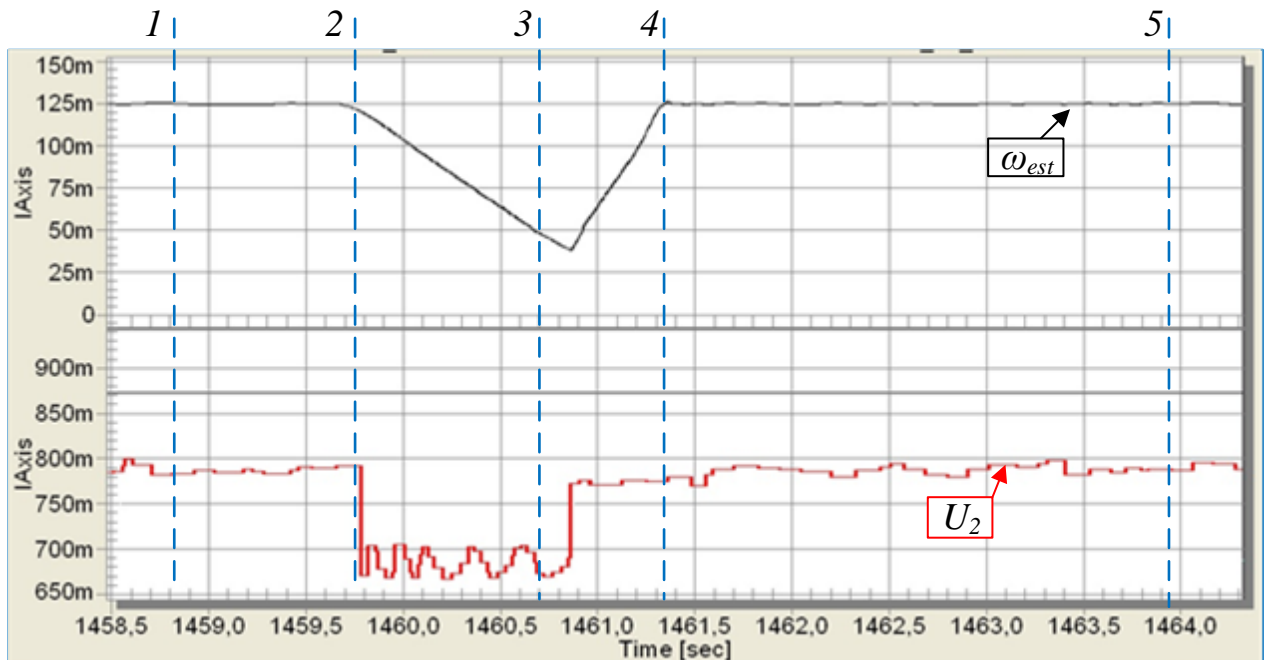


Рисунок 3.20 – Переходные процессы оценки скорости и напряжения звена постоянного тока при переключениях электропитания

Переходные процессы (рисунок 3.20), полученные в результате натурального эксперимента подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов

управления ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Время восстановления полной работоспособности ЭП составляет – 1,6 с, динамическая просадка скорости – 72 %.

Отличия показателей качества ЭП двойного электропитания при его цифровом моделировании (рисунок 3.15) и натурном эксперименте (рисунок 3.20) объясняется характером нагрузки. В цифровой модели нагрузка «вентиляторного» типа (что соответствует предполагаемому назначению разрабатываемой электромеханической системы), тогда как при экспериментальном исследовании – чисто «активная» нагрузка.

Выводы по главе

1. Рассмотрена силовая схема и принципы работы ПППТ. Представлены эпюры коммутационной функции и выходного тока ПППТ, математическое описание и регулировочные характеристики выходного тока и мощности ПППТ при различных напряжениях резервной сети.

2. Разработана система управления ПППТ, представлены математические выражения для нахождения коэффициентов регулятора тока и напряжения. Представлены графики переходных процессов контура тока и напряжения, а также переходные процессы ПППТ, полученные с помощью цифровых моделей. Время нарастания напряжения в ЗПТ ПЧ менее 100 мс (пять периодов входного напряжения основной сети).

3. Рассмотрена проблематика применения общепромышленного двухзвенного ПЧ в системах ЭП двойного электропитания. Разработана структура и представлено математическое описание «безударного рекуперативного» алгоритма управления. Приведены графики переходных процессов работы «безударного рекуперативного» алгоритма, полученные с помощью цифровых моделей. Представлены графики переходных процессов работы ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам теплого резервирования с замещением. Время полного восстановления работоспособности ЭП при

«вентиляторном» характере нагрузки составляет – 0,75 с, динамическая просадка скорости – 27 %.

4. Разработан стенд для испытания ЭП двойного электропитания. Рассмотрена проблематика изготовления ПППТ, а также даны рекомендации по конструктивным решениям и комплектующим. Представлены осциллограммы переходных процессов напряжений и токов ПППТ, полученные в результате натурного эксперимента. Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность разработанной системы управления ЭП двойного электропитания. Время восстановления полной работоспособности ЭП при «активном» характере нагрузки составляет – 1,6 с, динамическая просадка скорости – 72 %.

ГЛАВА 4 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ФУНКЦИЕЙ ПИТАНИЯ ОТ РЕЗЕРВНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1 Анализ устойчивости преобразователя постоянного тока при питании от источника ограниченной мощности

Резервная электросеть постоянного тока может быть реализована с помощью блоков аккумуляторных батарей или при помощи электромашин 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 влияют на устойчивость ЭП в целом.

Анализ устойчивости ЭП будем проводить частотным критерием Михайлова, так как передаточная функция линеаризованной системы имеет достаточно низкий порядок. Устойчивость системы определяется по годографу Михайлова, построенному на комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до ∞ [49]. Для составления характеристического полинома рассмотрим упрощенную силовую схему частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания (рисунок 4.1).

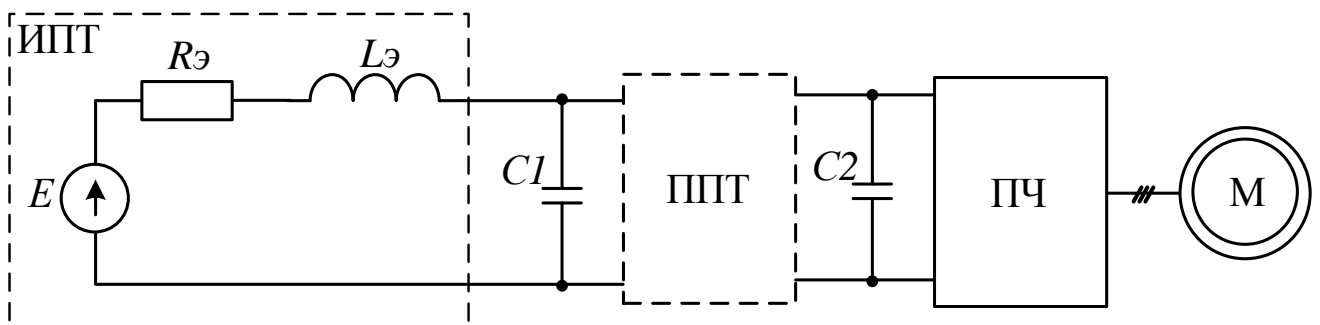


Рисунок 4.1 – Упрощенная силовая схема частотно-регулируемого ЭП двойного
электропитания

На рисунке 4.1 были приняты следующие обозначения: ИПТ – источник постоянного тока, ППТ – преобразователь постоянного тока в постоянный, ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты, М – электродвигатель переменного тока.

Согласно структуре силовой схемы, ППТ и резервную питающую сеть постоянного тока можно описать системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} U = R_{\text{э}} i + L_{\text{э}} \frac{di}{dt} + U_{dc1}, \\ U_{dc1} = \frac{1}{C_1} \int (i - i_l) dt, \\ U_{dc1} = \frac{P_l}{i_l}, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

где U – напряжение источника (ЭДС генератора); $R_{\text{э}}$ – эквивалентное активное сопротивление источника, которое включает: сопротивление якоря, добавочных полюсов и кабеля; $L_{\text{э}}$ – эквивалентная индуктивность источника; i – потребляемый ток ППТ, который заряжает первичную сторону; C_1 – емкость входного звена ППТ по первичной стороне; U_{dc1} – напряжение в первичном звене ППТ; i_l – ток нагрузки, разряжающий первичное звено ППТ; $P_l = P_{l0} = U_{dc0} I_{dc0}$ – мощность, отдаваемая ППТ на автономный инвертор напряжения, считаем постоянной, так как ППТ работает в режиме стабилизации мощности; U_{dc0} – напряжение первичного звена постоянного тока в точке линеаризации; I_{l0} – ток нагрузки в точке линеаризации.

Линеаризованная система (4.1) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U = R_{\text{э}} \Delta i + L_{\text{э}} \frac{d\Delta i}{dt} + \Delta U_{dc1}, \\ \Delta U_{dc1} = \frac{1}{C_1} \int (\Delta i - \Delta i_l) dt, \\ \Delta U_{dc1} = -\frac{\Delta P_l}{I_{l0}^2} \Delta i_l = -\frac{U_{dc0}}{I_{l0}} \Delta i_l = -R_0 \Delta i_l. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Характеристический полином линеаризованной силовой схемы частотно-регулируемого ЭП при питании от сети постоянного тока в частотной форме записи

$$D(j\omega) = -L_3 R_0 C_1 \omega^2 - (L_3 - R_0 R_3 C_1) j\omega - (R_3 - R_0), \quad (4.3)$$

соответственно мнимая и вещественная составляющая

$$\begin{aligned} P(\omega) &= -L_3 R_0 C_1 \omega^2 - (R_3 - R_0), \\ Q(\omega) &= -(L_3 - R_0 R_3 C_1) j\omega. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Согласно критерию Михайлова – для устойчивости линейной (линеаризованной) системы автоматического управления необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова при изменении частоты ω от 0 до ∞ , начинаясь на вещественной положительной полуоси, проходил последовательно в положительном направлении, нигде не обращаясь в 0, n – квадрантов.

Тогда, в зависимости от напряжения звена ППТ и мощности в точке линеаризации, возможно три случая:

$$\begin{aligned} a) R_0 &= \frac{U_{dc1}^2}{P_l} > \frac{L_3}{R_3 C_1}, \\ б) R_0 &= \frac{U_{dc1}^2}{P_l} = \frac{L_3}{R_3 C_1}, \\ в) R_0 &= \frac{U_{dc1}^2}{P_l} < \frac{L_3}{R_3 C_1}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

На рисунке 4.3 представлены годографы, демонстрирующие что: а) система является устойчивой; б) система находится на границе колебательной устойчивости; в) система является неустойчивой.

Для подтверждения результатов исследования устойчивости системы критерием Михайлова, на рисунке 4.3 представлен корневой годограф, построенный по характеристическому полиному (4.4). Отсюда видно, что при постоянстве мощности и понижении напряжения первичного звена ППТ, корни полинома смещаются в область неустойчивости (область с положительной вещественной частью), и при определенном значении входного напряжения система становится неустойчивой.

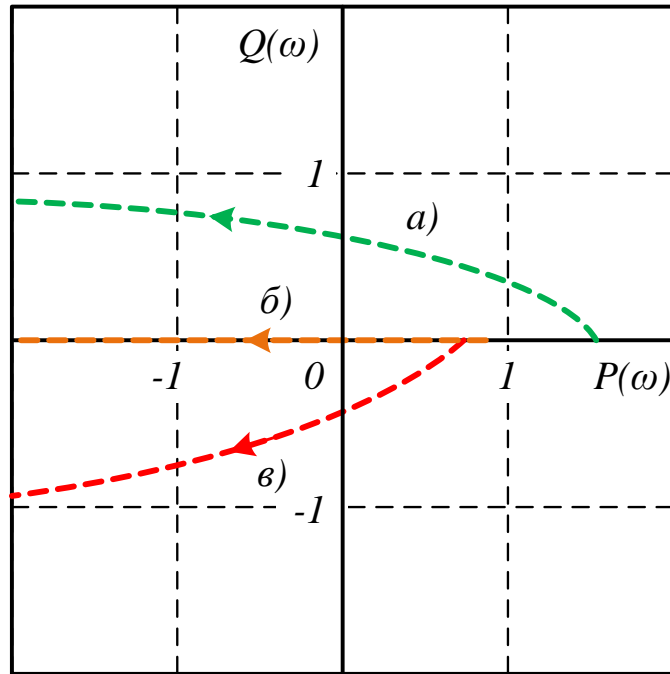


Рисунок 4.2 – Годографы Михайлова при питании ЭП от резервной сети постоянного тока

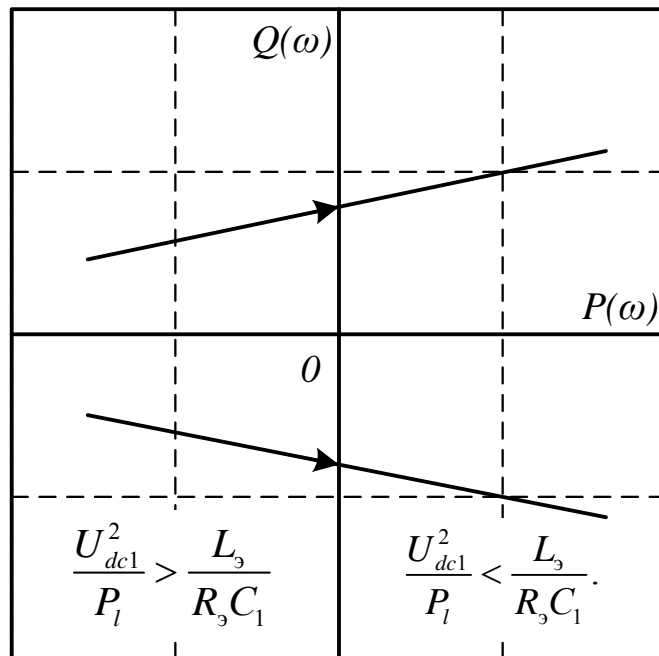


Рисунок 4.3 – Корневой годограф при питании ЭП от резервной сети постоянного тока

На рисунках 4.4 – 4.6 показаны графики переходных процессов механической частоты вращения асинхронного двигателя и напряжений звеньев постоянного

тока, полученных с помощью цифровой модели в пакете программ Matlab/Simulink (Приложение В).

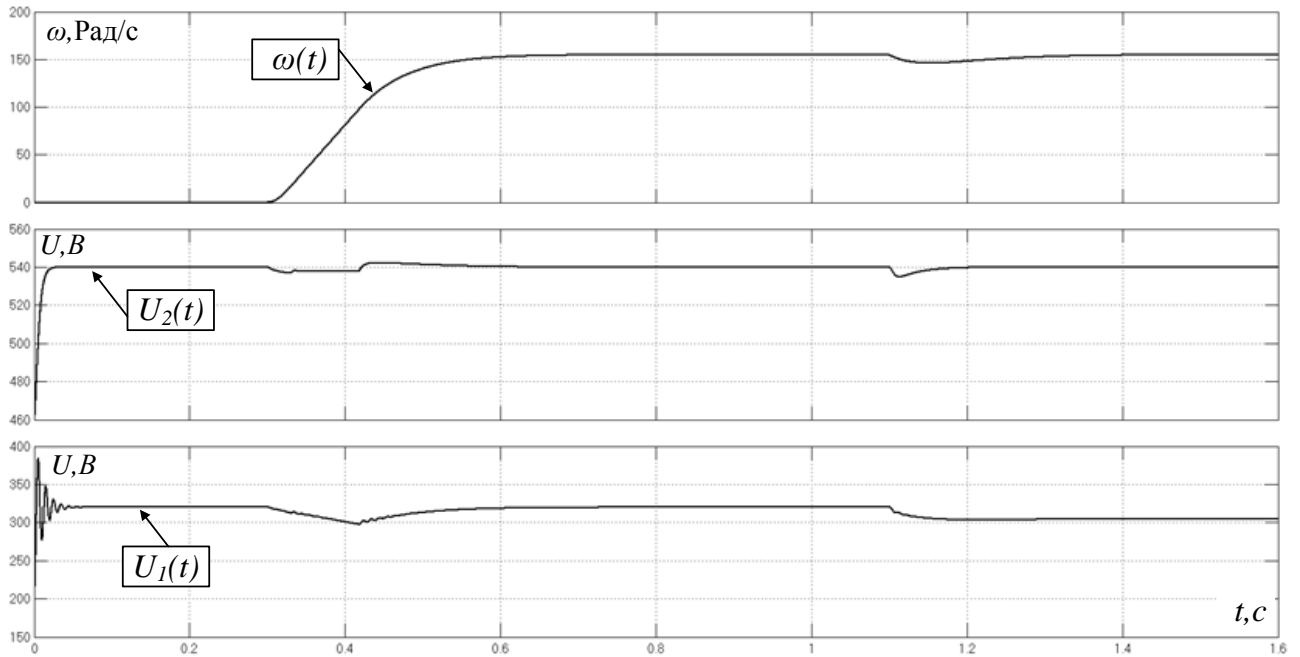


Рисунок 4.4 – Устойчивая работа ЭП ($R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} > \frac{L_\Delta}{R_\Delta C_1}$)

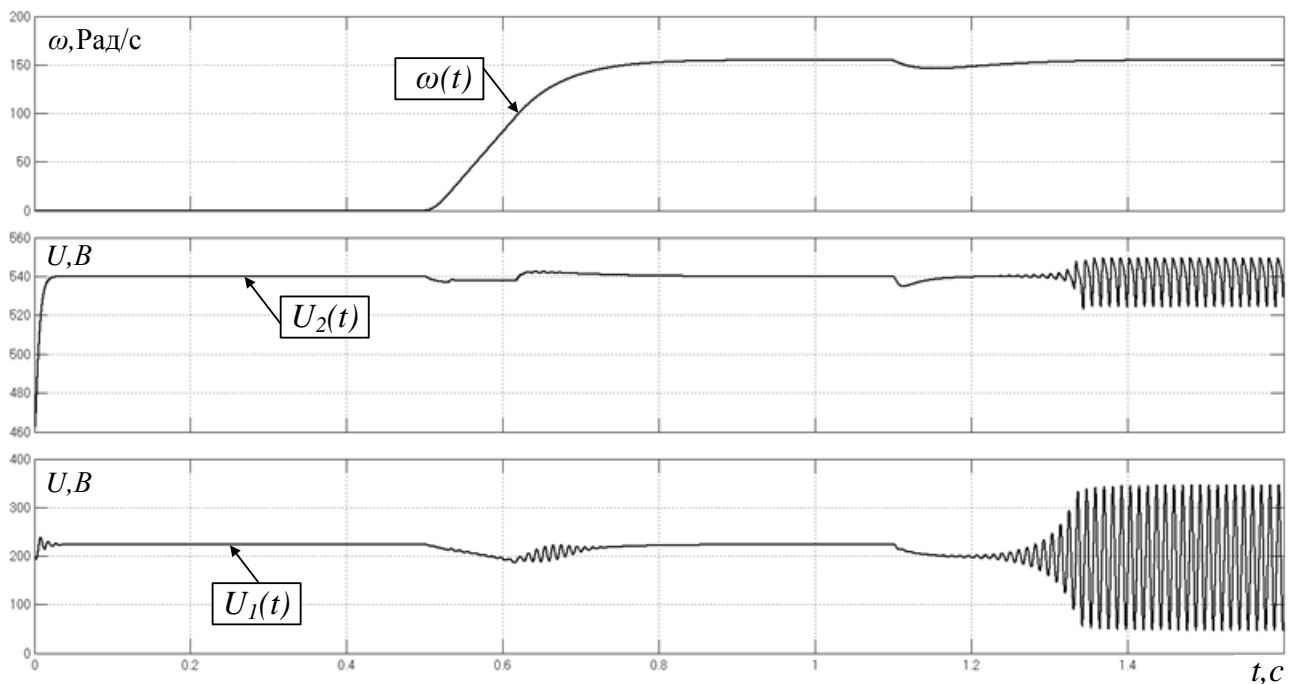


Рисунок 4.5 – Работа ЭП на границе устойчивости ($R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} = \frac{L_\Delta}{R_\Delta C_1}$)

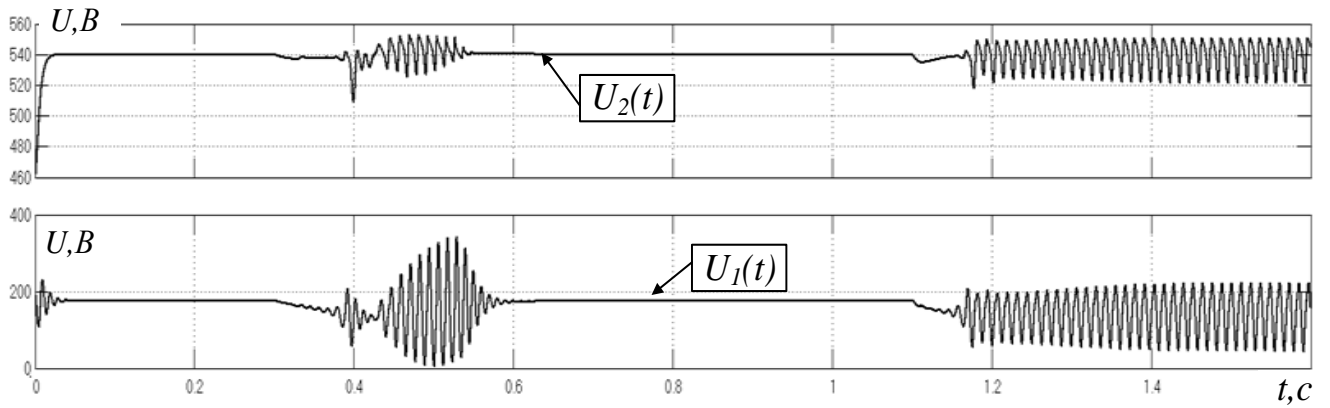


Рисунок 4.6 – Неустойчивая работа ЭП ($R_0 = \frac{U_{dc1}^2}{P_l} < \frac{L_\varepsilon}{R_\varepsilon C_1}$)

В данном случае, устойчивая работа ЭП двойного электропитания возможна со снижением выходной мощности и соответственно нагрузки электродвигателя, что не всегда возможно в рамках технологического процесса. Устойчивую работу ЭП двойного электропитания и исключения возникновения колебательных процессов системы управления ППТ возможно обеспечить, как с помощью параметрического изменения системы (подбор параметров $C_1, R_\varepsilon, L_\varepsilon$), так и алгоритмическими методами (алгоритм динамической коррекции).

Для обеспечения устойчивой работы системы управления ППТ, предлагается ввести «добавку» к мощности ΔP

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (4.6)$$

где

$$\Delta P = C_\varepsilon \frac{dU_{dc}}{dt} U_{dc}. \quad (4.7)$$

Потребляемый ток ППТ с учетом выражений 4.6, 4.7, который заряжает первичную сторону ЗПТ примет вид

$$i = \frac{P}{U_{dc}} = \frac{P_0}{U_{dc}} + C_\varepsilon \frac{dU_{dc}}{dt}. \quad (4.8)$$

Линеаризованное выражение 4.8

$$i = \frac{P_0}{U_0^2} \Delta U_{dc} + C_{\text{Э}} \frac{d\Delta U_{dc}}{dt}. \quad (4.9)$$

Соответствующая схема замещения для приращений представлена на рисунке 4.7.

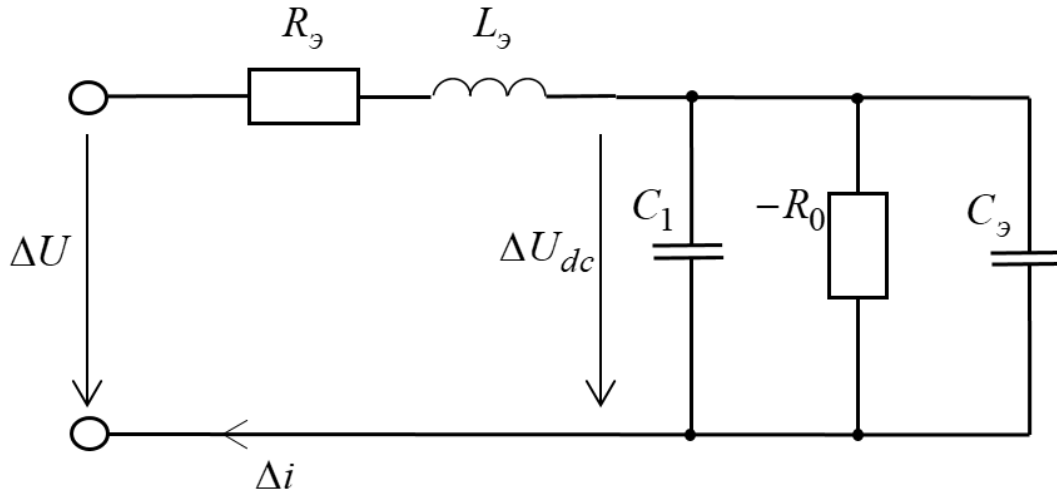


Рисунок 4.7 – Схема замещения линеаризованной системы ЭП

Согласно годографу, представленному ранее, для устойчивой работы системы управления необходимо чтобы выполнялось условие

$$\frac{L_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}} < C_{\text{Э}} R_0. \quad (4.10)$$

То есть, энергия в первичное звено постоянного тока должна поступать быстрее, чем потребляется автономным инвертором напряжения. Тогда, при

$R_0 = \frac{U_{dc}^2}{P}$, можно определить величину $C_{\text{Э}}$

$$C_{\text{Э}} = \frac{L_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}} \frac{P_0}{U_{dc}^2}. \quad (4.11)$$

Следовательно, величина «добавки» примет вид

$$\Delta P = \frac{L_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}} \frac{dU_{dc}}{dt} \frac{P_0}{U_{dc}}. \quad (4.12)$$

На рисунке 4.8 представлены переходные процессы по механической частоте вращения электродвигателя, напряжению звеньев постоянного тока ППТ. ЭП 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).

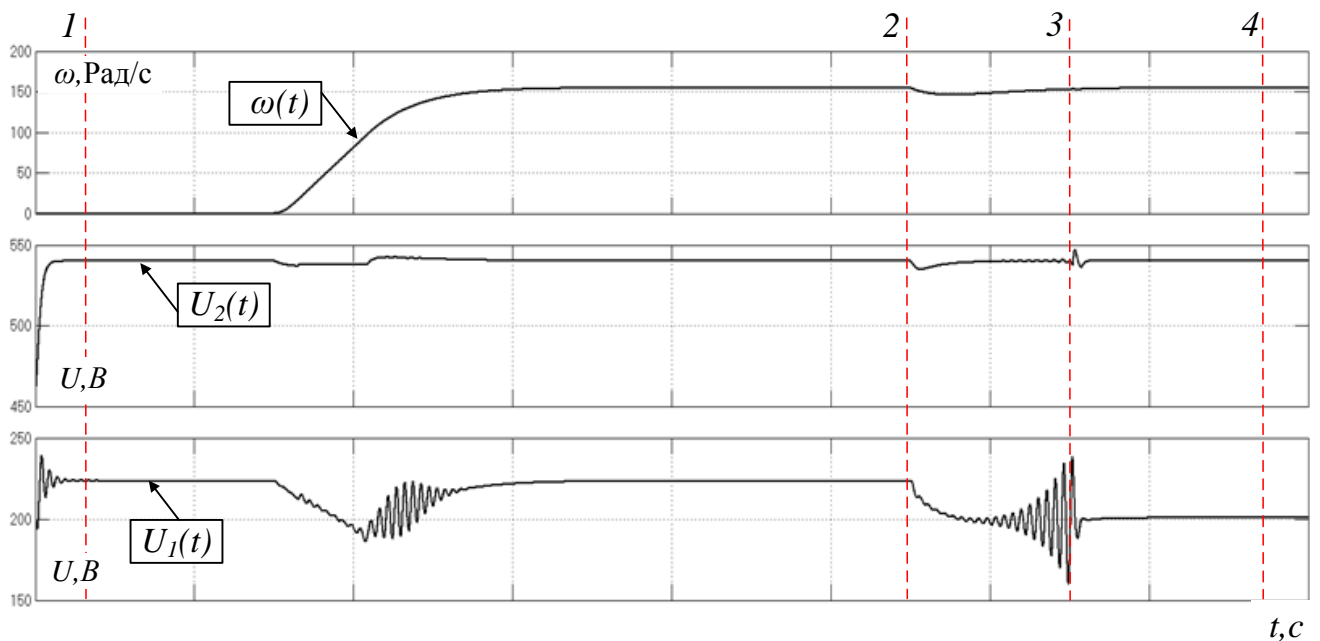


Рисунок 4.8 – Переходные процессы ЭП в системе двойного электропитания с алгоритмом динамической коррекции

Переходные процессы показывают, что предложенный алгоритм динамической коррекции выполняет свою задачу. Алгоритм динамической коррекции обеспечивает устойчивую работу ЭП вне зависимости от внутренних параметров и уровня напряжения резервной сети постоянного тока.

4.2 Высоковольтные частотно-регулируемые электроприводы переменного тока двойного электропитания

Для управления мощными асинхронными и синхронными электродвигателями с напряжением питания от 3 кВ до 10 кВ используются

высоковольтные преобразователи частоты (ВПЧ), которые построены на базе многоуровневого инвертора напряжения. Существует много схемотехнических решений построения многоуровневых инверторов с фиксированной нейтральной точкой (neutral point clamped inverter), с плавающими конденсаторами (flying capacitors inverter) и др [58-61]. Однако наибольшее распространение имеет схема в виде последовательного соединения Н-мостов (рисунок 4.9) (series-connected H-bridge inverter) [51-53].

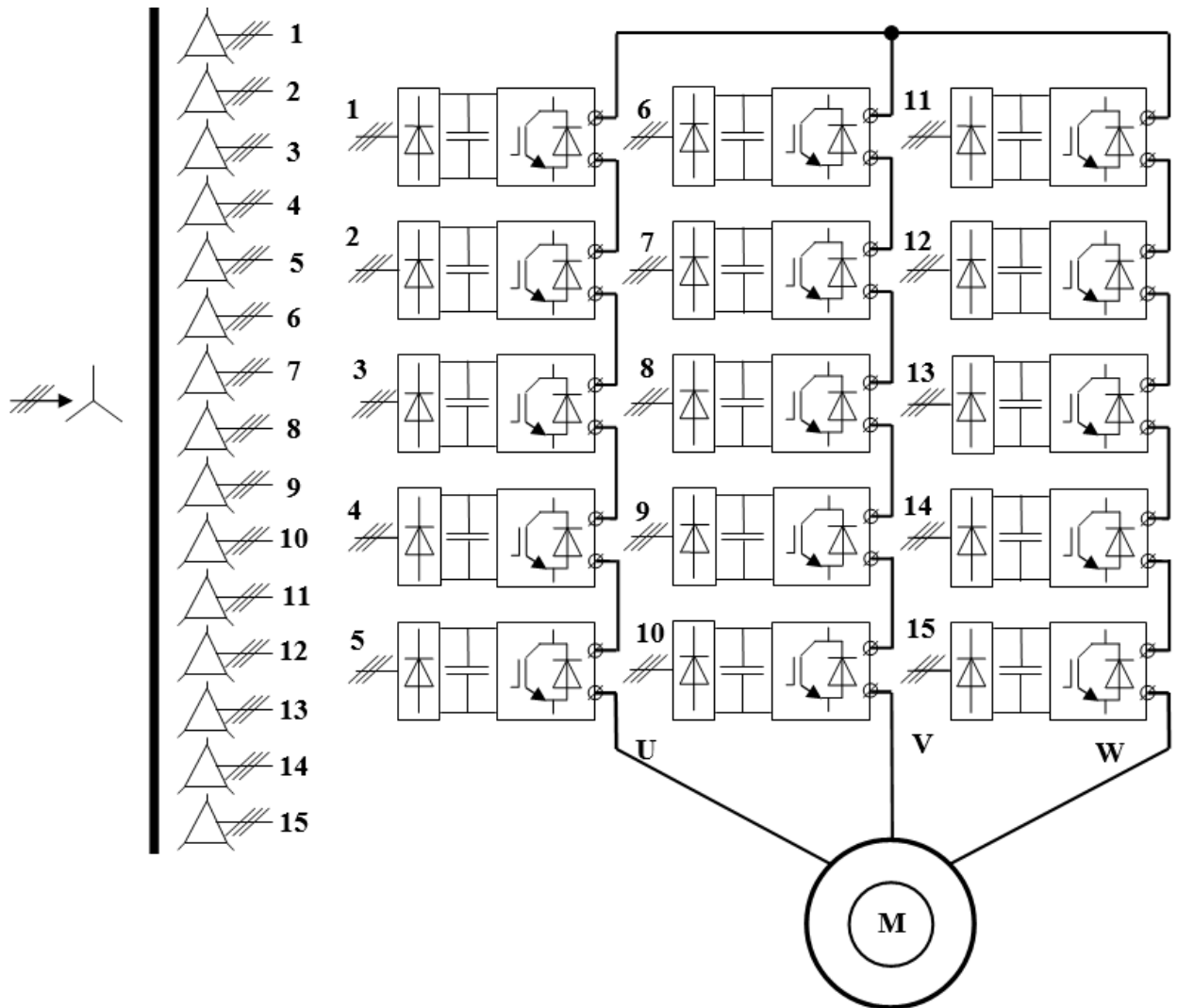


Рисунок 4.9 – Общая электрическая схема высоковольтного многоуровневого ПЧ

Каждая силовая ячейка (рисунок 4.10) состоит из выпрямительного комплекта (ВК), звена постоянного тока (ЗПТ) и собственно Н-моста (АИН). Структура Н-моста построена при помощи четырех IGBT – транзисторов с обратными диодами или из двух стоек.

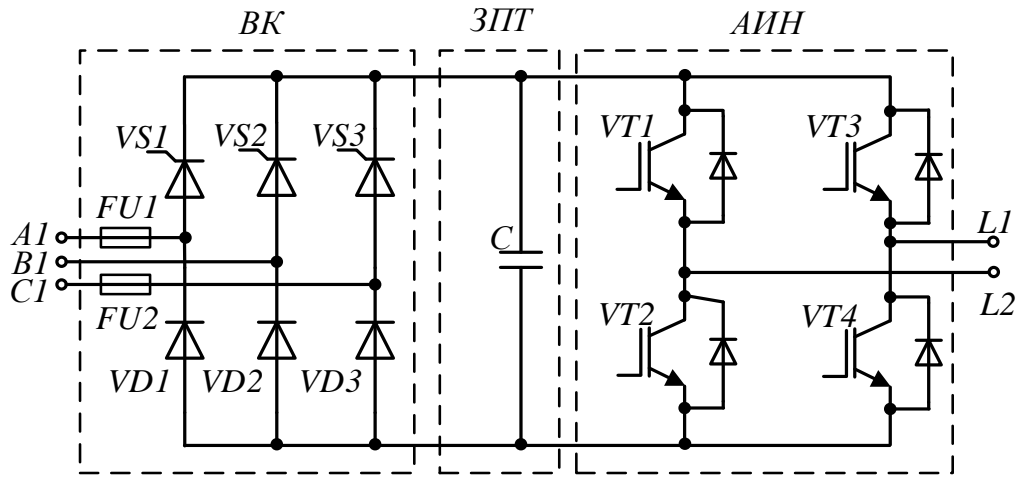


Рисунок 4.10 – Электрическая схема каждой силовой ячейки

Питание силовой ячейки осуществляется от силового многообмоточного согласующего трансформатора. При этом каждая силовая ячейка питается от гальванически развязанной трехфазной сети, что является обязательным условием построения схем многоуровневых инверторов напряжения.

Высоковольтные ПЧ чаще всего применяются в системах ЭП большой мощности и являются соответственно весьма недешевыми по стоимости, что в свою очередь, определяет дополнительные требования к живучести системы в целом, в отличие от низковольтных ПЧ. Для повышения живучести ВПЧ применяют как программные, так и аппаратные методы [54]:

1. Алгоритмы самопитания (частично были рассмотрены в главе 3 данной диссертационной работы). При сбоях электропитания ВПЧ в течение 1-10 с или в режимах переключения питающего фидера могут применяться различные алгоритмы самопитания за счет запаса кинетической энергии вращающихся механических узлов электропривода. Электрическая машина в таком режиме переводится в генераторный режим, а контур скорости, за счет изменения сигналов задания и структуры системы управления, осуществляет стабилизацию напряжения звеньев постоянного тока всех силовых ячеек.

2. Алгоритм байпаса силовых ячеек со снижением выходной мощности. В аварийных ситуациях при неисправностях в одной или нескольких силовых ячейках возможна работа ЭП со снижением выходного напряжения или со

снижением выходной мощности. При этом, вход и выход неисправной ячейки замыкается накоротко с помощью контактора или дополнительных полупроводниковых элементов, а в системе управления активизируется специальный алгоритм выравнивания линейных напряжений со смещением нулевой точки.

3. Алгоритм байпаса силовых ячеек без снижение выходной мощности. Реализация мажоритарной схемы построения многоуровневого инвертора напряжения возможно, если напряжение питания каждой ячейки выбрать с необходимым запасом или при помощи дополнительных ячеек (с частичным резервированием) в каждую фазу инвертора. При этом, авария одной силовой ячейки в каждой из фаз не приведет к просадке выходного напряжения ВПЧ.

Работу высоковольтного ПЧ возможно организовать по схеме двойного электропитания с основной сети переменного тока (3-10 кВ) и резервной сети постоянного тока или аккумуляторных батарей [68]. На рисунке 4.11 представлена структура силовой ячейки с резервным электропитанием постоянного тока.

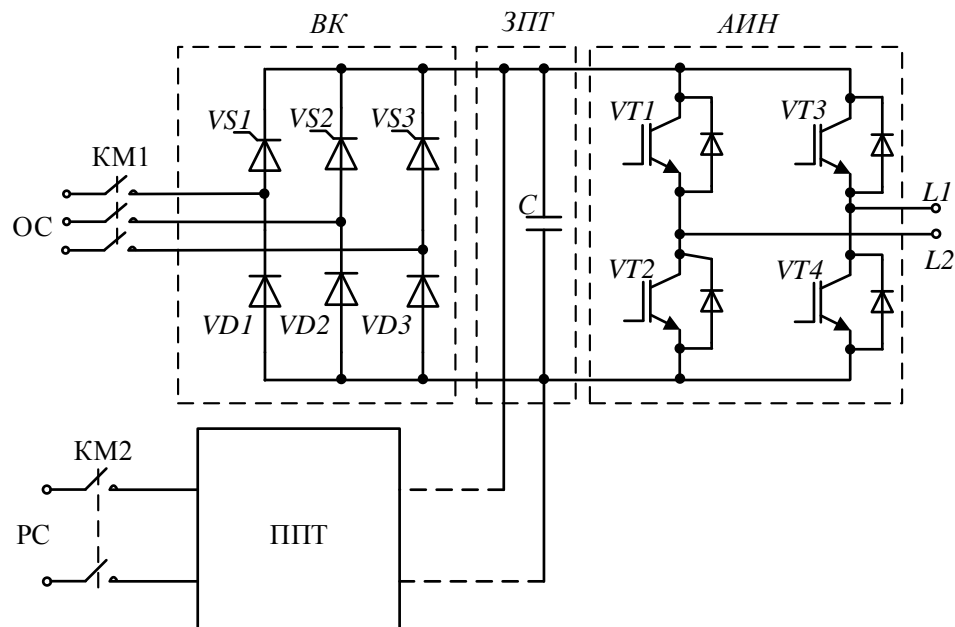


Рисунок 4.11 – Электрическая схема силовой ячейки двойного электропитания

Резервные источники силовых ячеек должны быть гальванически развязаны, соответственно количество резервных источников равно количеству силовых ячеек. Стабилизацию звена постоянного тока каждой ячейки при питании от

резервной сети обеспечивает ППТ, при этом преобразователь постоянного тока в постоянный должен быть гальванически развязанным, согласно принципам функционирования многоуровневого инвертора. Несмотря на большие мощности высоковольтных преобразователей частоты, мощность отдельной ячейки и соответственно ППТ относительно не большая. К примеру, мощность одной силовой ячейки ВПЧ мощностью 800 кВт, 6 кВ составляет около 53 кВт. Мощность же резервного источника выбирается исходя из требуемого времени работы от РС.

Выводы по главе

1. Рассмотрена проблематика устойчивости ППТ при вариациях внутренних параметров резервной сети. Предложен алгоритм динамической коррекции системы управления ППТ, обеспечивающий устойчивую работу во всем диапазоне нагрузок и входных напряжений. Обеспечены требуемые показатели качества переходных процессов ЭП независимо от типа источника питания резервной сети. Результаты работы алгоритма динамической коррекции подтверждены с помощью цифровых моделей.

2. Рассмотрены основные схемы построения высоковольтных многоуровневых ПЧ. Рассмотрены основные алгоритмические и параметрические методы повышения живучести высоковольтных ПЧ. Предложена электрическая схема построения высоковольтных частотно-регулируемых ЭП двойного электропитания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили получить следующие основные результаты.

1. Определены основные способы резервирования, применимые для частотно-регулируемых ЭП 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 процессов ЭП независимо от параметров источников питания резервной сети. Устойчивая работа достигается во всем диапазоне нагрузок и входных напряжений резервного источника питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
2. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1985. – 128 с.
3. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 66 с.
4. S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, Y. Takeda. Sensorless Control Strategy for Salient-Pole PMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2002. – Vol. 38. – №4. – P. 1054–1061.
5. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства MEGA. Руководство пользователя. – М.: Издательский дом «Додэка- XXI», 2007. – 592 с.: ил.
6. Rodrigues J.I. A multilevel inverter topology for inductively coupled power transfer/ J.I. Rodrigues, S.B. Leeb // IEEE Transactions Power Electronics. – 2006. – no.6. P. 1606-1617.
7. Белоокая Н.В. Обзор альтернативных источников энергии. Геотермальная энергия/ Белоокая Н.В., Пивоварова Е.И.// Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2015.-№1.- с.62-72.
8. Advances in Lithium-Ion Batteries/Ed. W. A. vah Schalkwijk and B. Scrosati. N.Y., Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002. 507 p.
9. В. Е. Conway. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. Kuwer-Plenum Publ. Co. N-Y.: 1999.
10. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Термины и определения – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2015. – 28 с.
11. Гуськов А.В., Милевский К.Е. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб-ник / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 427 с.

12. Малюшенко В.В, Михайлов А.К. Энергетические насосы: справочное пособие / Энергоиздат. М., 1981. – 200 с.
13. Локалов Г. А., Марковский В. М. Осевые и центробежные насосы тепловых электрических станций : учебное пособие / Урал. ун-та. Екатеринбург, 2016. — 140 с.
14. В. Феллер. Глава XI. Целочисленные величины. Производящие функции // Введение в теорию вероятностей и её приложения / An introduction to probability theory and its applicatons / Пер. с англ. Р. Л. Добрушина, А. А. Юшкевича, С. А. Молчанова; С предисловием А. Н. Колмогорова; Под ред. Е. Б. Дынкина. — 2-е изд. — Москва: Мир, 1964. — 270—272 с.
15. Гапутов В.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий/ издательство металлургия. – Владимир, 1990. – 272 с.
16. Volker Quaschnig. Understanding Renewable Energy Systems – Bath Press – London, 2005.
17. Четошникова Л.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Изд-во ЮУрГУ. – Челябинск, 2010. – 69 с.
18. Chem J. Graphene-based electrochemical supercapacitors/ Sci., Vol. 120, No. 1, January 2008, pp. 9–13
19. Stuart Lansburg; Clémence Siret. Green and compact backup battery solution for a green datacenter/ 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2015, pp. 1-6.
20. Левченко М.Т., Хомяков М.Н. Автоматическое включение резерва/ Энергия. – Москва, 1971. – 80 с.
21. Романов В. В. Хашев Ю.М. Химические источники тока/ Изд-во «Советское радио», 1968. – 384 с.
22. Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.
23. Shuhuai Shi, Yan Yang, Tianhua Zhu, Feng Wang, Fang Zhuo. High Power DC/AC/DC Converter Based on Different Modulation Strategies/ 2016 IEEE 8 th

International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016, pp. 315 – 320.

24. Chi-Seng Lam, Chi-Yung Chung, Man-Chung Wong. Review of Current Quality Compensators for High Power Unidirectional Electric Vehicle Battery Charger/2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2013, pp. 259 – 264.

25. Mojtaba Forouzesh, Student Member, IEEE, Yam P. Siwakoti, Member, IEEE, Saman A. Gorji, Student Member, IEEE, Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE, and Brad Lehman, Senior Member, IEEE. Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications/ IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 32, NO. 12, DECEMBER 2017, pp 9143 – 9178.

26. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.

27. Kheraluwala M.H. Performance Characterization of a High-Power Dual Active Bridge dc-to-dc Converter / M.H. Kheraluwala, R.W. Gascoigne, D.M. Divan, E.D. Baumann // IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, no. 6, Nov./Dec. 1992, pp. 1294 – 1301.

28. Inoue S. A Bidirectional DC–DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, Nov. 2007, pp. 2299 – 2306.

29. Доманов С.С. Синтез системы управления двунаправленным преобразователем постоянного тока / С.С. Доманов, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Материалы XI Международной конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2012 (Новосибирск, 2 – 4 октября 2012 г.), т. 7. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – С. 151 – 154.

30. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

31. Берестов В.М. Регулируемые электроприводы герметичных корабельных насосов на базе синхронных машин с преобразователем для резервного электропитания от сети постоянного тока / В.М. Берестов, В.Ю. Волков, В.А. Клан, В.В. Панкратов и др. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. – С. 185 – 191.

32. Берестов В.М. Частотно-регулируемый электропривод с резервным питанием от сети постоянного тока / В.М. Берестов, В.В. Вдовин, В.Ю. Волков, С.С. Доманов, В.А. Клан, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 43 – 46.

33. Нос О.В. Разработка и оптимизация алгоритмов управления асинхронным электроприводом на основе метода непрерывной иерархии: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / О. В. Нос. – Новосибирск, 1999. – 247с.

34. Vladimir V. Vdovin, Denis P. Visloguzov, Victor A. Klan, Denis A. Kotin, Vladimir V. Pankratov, Andrey V. Smetannikov. DC Mains Backup Power System for Frequency-Controlled Electric Drive // 15 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Conference Proceedings, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July, 2014. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 387 – 391.

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

36. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

37. S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, Y. Takeda. Sensorless Control Strategy for Salient-Pole PMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2002. – Vol. 38. – №4. – P. 1054–1061.

38. Gambling, W. A., «The Rise and Rise of Optical Fibers», IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6, pp. 1084-1093, Nov./Dec. 2000

39. Yoshihiro Kawase , Tadashi Yamaguchi , Kousuke Miyoshi, Masaya Murashita , Yuji Shindo , Naoki Yoshikawa and Tetsuma Yoshitake. Iron Loss Analysis in Wound Core of Reactor with Gap Considering Skin Effect // Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan Kawasaki Heavy Industries, Ltd, Hyogo 650-8680, Japan

40. Bailey D., Wright E. Practical SCADA for Industry. Elsevier, 2003

41. W. Li, X. Li, Y. Deng, J. Liu, and X. He, “A review of nonisolated high step-up dc/dc converters in renewable energy applications”, 24th Annual Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC) IEEE 1, 364–369 (2009).

42. 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.

43. А. С. Востриков. Теория автоматического регулирования: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Востриков, Г. А. Французова. — М.: Издательство Юрайт, 2017 — 279

44. Вислогузов Д.П., Котин Д.А., Волков В.Ю. Алгоритм работы электропривода переменного тока в условиях кратковременной пропажи питающей сети // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (Пермь, 03 – 07 октября 2016 г.) – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. – С. 16 – 19

45. Панкратов В.В. Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе / В.В. Панкратов, Д.А. Котин // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2010. – №4. – С. 46 – 51.

46. Панкратов В.В. Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова / В.В. Панкратов, Д.А. Котин // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 48 – 53.

47. Вдовин В.В., Панкратов В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. Энергетика. – С. 147 – 153.
48. Панкратов В.В. Глобально устойчивый адаптивный наблюдатель для систем общепромышленного асинхронного электропривода / В.В. Панкратов, В.В. Вдовин, Г.Г. Ситников, С.С. Доманов // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 42 – 47.
49. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
50. Панкратов В.В., Нос О.В., Зима Е.А. Избранные разделы теории автоматического управления: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.
51. Tolbert L.M., Peng F.Z., Habetler T.G.: 'Multilevel converters for large electric drives', IEEE Trans. Ind. Appl., 1999, 35, pp. 36–44
52. Rodríguez J., Franquelo L.G., Kouro S., ET AL.: 'Multilevel converters: an enabling technology for high-power applications', Proc. IEEE, 2009, 97, pp. 1786–1817
53. Lai J.-S., Peng F.Z.: 'Multilevel converters-a new breed of power converters', IEEE Trans. Ind. Appl., 1996, 32, pp. 509–517
54. Д. П. Вислогузов, В. В. Вдовин, О.В. Нос, Е. С. Кучер, В. А. Клан. Специализированные функции многоуровневых преобразователей частоты «Эратон-В» с каскадным включением H-мостов // Труды XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (Пермь, 03 – 07 октября 2018 г.) – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2018. – С. 16 – 19.
55. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Э.А. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
56. А.Б. Виноградов Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с
57. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / под общ. Ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

58. Krug D. Comparison of 2.3-kV Medium-Voltage Multilevel Converters for Industrial Medium-Voltage Drives / D. Krug, S. Bernet, S. S. Fazel, K. Jalili, M. Malinowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – vol. 54, no. 6. – P. 2979-2992.

59. Steimer P. K. A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters / J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, I. E. Lizama // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – vol. 57, no. 7. – P. 2219-2230.

60. Bruckner T. The active NPC converter and its loss-balancing control / T. Bruckner, S. Bernet, H. Guldner // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – vol. 52, no. 3. – P. 855-868.

61. Hosoda H. Multi-level converters for large capacity motor drive / H. Hosoda, S. Peak // In Proc. IECON'10. – 2010. – P. 516-522.

62. Котин Д. А. Методика синтеза адаптивных алгоритмов "бездатчикового" векторного управления асинхронным электроприводом / Д. А. Котин, Д. А. Котин, В. В. Панкратов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007: Материалы третьей научно-технической конференции с международным участием / Под ред. В.В. Панкратова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 51 – 57.

63. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift, 1971. Bd. 45, – H. 10. – S. 757 – 760.

64. J. Holtz. Sensorless Control of Induction Motor Drives / Proceedings of the IEEE, August 2002, vol. 90, no.8. Aug. 2002, pp. 1359-1394

65. Харитонов С. А. Система бесперебойного электропитания автономных объектов с параллельной работой от источников постоянного и переменного напряжения / С. А. Харитонов, Д. А. Штейн, А. В. Гейст, Д. В. Коробков, А. Н. Решетников, М. В. Балагуров, В. С. Коняхин // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : материалы 13 Всерос. науч.-техн. конф. : сб. докл. - Москва : НаукаСофт, 2016. – С. 487-491.

66. Kharitonov S. A. Mathematical model of AC-AC converter without passive elements in DC-link / S. A. Kharitonov, M. V. Balagurov, P. A. Bachurin, A. G. Volkov // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014) : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk: IEEE, 2014. – P. 403-407.

67. Шульц Т. Е. Анализ особенности использования солнечной энергетики в сибирском регионе / Т. Е. Шульц, Д. А. Штейн, С. В. Брованов // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых Наука. Технологии. Инновации, Новосибирск, 21-24 ноября 2013 г. - Новосибирск: НГТУ, 2013. - С. 192-194.

68. Дыбко М. А. Исследование параллельной работы многоуровневых преобразователей напряжения для систем накопления энергии = A Study on Multilevel Voltage Source Converters Operation for Energy Storage Systems / М. А. Дыбко, С. В. Брованов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2013. – № 4. – С. 156–167.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример расчета коэффициентов регуляторов гальванически развязанного преобразователя постоянного тока в постоянный и синхронного двигателя с постоянными магнитами

Основные параметры макетного образца гальванически развязанного ППТ представлены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Основные параметры макетного образца гальванически развязанного ППТ

Параметр ППТ	Численное значение	Единица измерения
Номинальная мощность ППТ	60	кВт
Входное напряжение	175–320	В
Выходное напряжение	520	В
Частота коммутации	20	кГц
Емкость конденсаторов первичной стороны	6000	мкФ
Емкость конденсаторов вторичной стороны	6000	мкФ
Приведенная индуктивность	3	мкГн
Коэффициент трансформации	2	–

Коэффициент интегральной части регулятора контура тока ППТ равен

$$k_{\text{и}} = \frac{\Omega_{\text{жел}}}{k_d k_{dI_2}} = \frac{6,28 \cdot 10^3}{7,23 \cdot 1} = 0,869 \cdot 10^3 \text{ (о.е.)},$$

где $k_d = \frac{I_{2\text{н}}}{\delta_{\text{н}}} = 7,23 \text{ (А/рад.)}$, $k_{dI_2} = 1 \text{ (о.е.)}$.

Коэффициент пропорциональной части регулятора контура напряжения равен

$$k_{\Pi} = \frac{A_1 \Omega_H k_{\mathcal{E}}}{k_{dU_2}} = \frac{2 \cdot 314,16 \cdot 6000 \cdot 10^{-6}}{1} = 3,77 \text{ (о.е.)},$$

где для монотонного переходного процесса коэффициент формы был принят $A_1 = 2$; $\Omega_H = 314,16$ (Гц) – частота нормированного полинома; $k_{\mathcal{E}} = k_{dI_2} C$ – эквивалентный коэффициент, $k_{dU_2} = 1$ (о.е.).

Коэффициент интегральной части равен

$$k_{\mathcal{I}} = \frac{\Omega_H^2 k_{\mathcal{E}}}{k_{dU_2}} = \frac{314,16^2 \cdot 6000 \cdot 10^{-6}}{1} = 592,18 \text{ (о.е.)}.$$

Основные параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами представлены в таблице А.2.

Таблица А.2 – Основные параметры СДПМ

Параметр электродвигателя	Численное значение	Единица измерения
Мощность двигателя	55	кВт
Номинальный ток двигателя	122	А
Номинальная частота вращения ротора	314,16	рад/с
Номинальное питающее напряжение	207,84	В
Частота питающей сети	250	Гц
Число пар полюсов	5	–
Потокосцепление от постоянных магнитов	0,1556	Вб
Индуктивность двигателя	$0,7 \cdot 10^{-3}$	Гн
Активное сопротивление статора	0,040	Ом
Номинальный момент двигателя	142,2	Н·м
Момент инерции на валу	0,3	кг·м ²
КПД	0,97	–

Электромагнитная постоянная времени двигателя

$$T_{es} = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{0,040} = 0,0175 \text{ (с)}.$$

Коэффициент передачи ШИП

$$K_m = \frac{U_{\max \text{ дв}}}{U_{\max \text{ ПТ}}} = \frac{293,94}{1} = 293,94 \text{ (В)},$$

где $U_{\max \text{ дв}} = \sqrt{2} \cdot U_n = 293,94 \text{ (В)}$; максимальное задание $U_{\max \text{ ПТ}} = 1 \text{ (о.е.)}$

Коэффициент обратной связи по току

$$K_{ba} = \frac{U_{\max T}}{I_{\max}} = \frac{1}{244} = 4,1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{\text{А}} \right),$$

где $I_{\max} = 2 \cdot I_n = 244 \text{ А}$, максимальное задание по току $U_{\max T} = 1 \text{ (о.е.)}$

Постоянная времени контура равна

$$T_{\text{крТ}} = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{2\pi \cdot 500} = 3,1831 \cdot 10^{-4} \text{ (с)},$$

где $\omega_n = \frac{f_{\text{ШИМ}}}{K_{\text{рд}}} = \frac{5000}{10} = 500 \text{ (Гц)}$.

Коэффициент интегрального регулятора равен

$$K_i = \frac{R_s \cdot f_{\text{ШИМ}}}{K_{\text{рд}} \cdot K_{ba} \cdot K_m} = \frac{0,040 \cdot 5000}{10 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 293,94} = 104,3141 \left(\frac{1}{\text{с}} \right).$$

Коэффициент обратной связи по скорости равен

$$K_{br} = \frac{U_{\max \omega}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{314,16} = 3,183 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{с}}{\text{рад}} \right),$$

где максимальное задание по скорости равно $U_{\max \omega} = 1 \text{ (о.е.)}$.

Эквивалентный коэффициент контура скорости равен

$$K_s = \frac{3p_n \psi \mu}{2K_{ba}} = \frac{3 \cdot 5 \cdot 0,1556}{2 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3}} = 284,63 \text{ (А} \cdot \text{Вб)}.$$

Коэффициент пропорциональной части регулятора контура скорости равен

$$K_{\text{пр}} = \frac{A_1 \Omega J}{K_s K_{br}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 62,8 \cdot 0,3}{284,63 \cdot 3,183 \cdot 10^{-3}} = 14,7 \text{ (о.е.)},$$

где $\Omega = 2\pi \cdot 5$ (Гц), $A_1 = \sqrt{2}$.

Коэффициент интегральной части регулятора равен

$$K_{инт} = \frac{\Omega^2 J}{K_s K_{br}} = \frac{62,8^2 \cdot 0,3}{284,63 \cdot 3,183 \cdot 10^{-3}} = 326,75 \left(\frac{1}{c}\right).$$

Модель частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания, работающего согласно принципам горячего резервирования с замещением представлена на рисунке А.1.

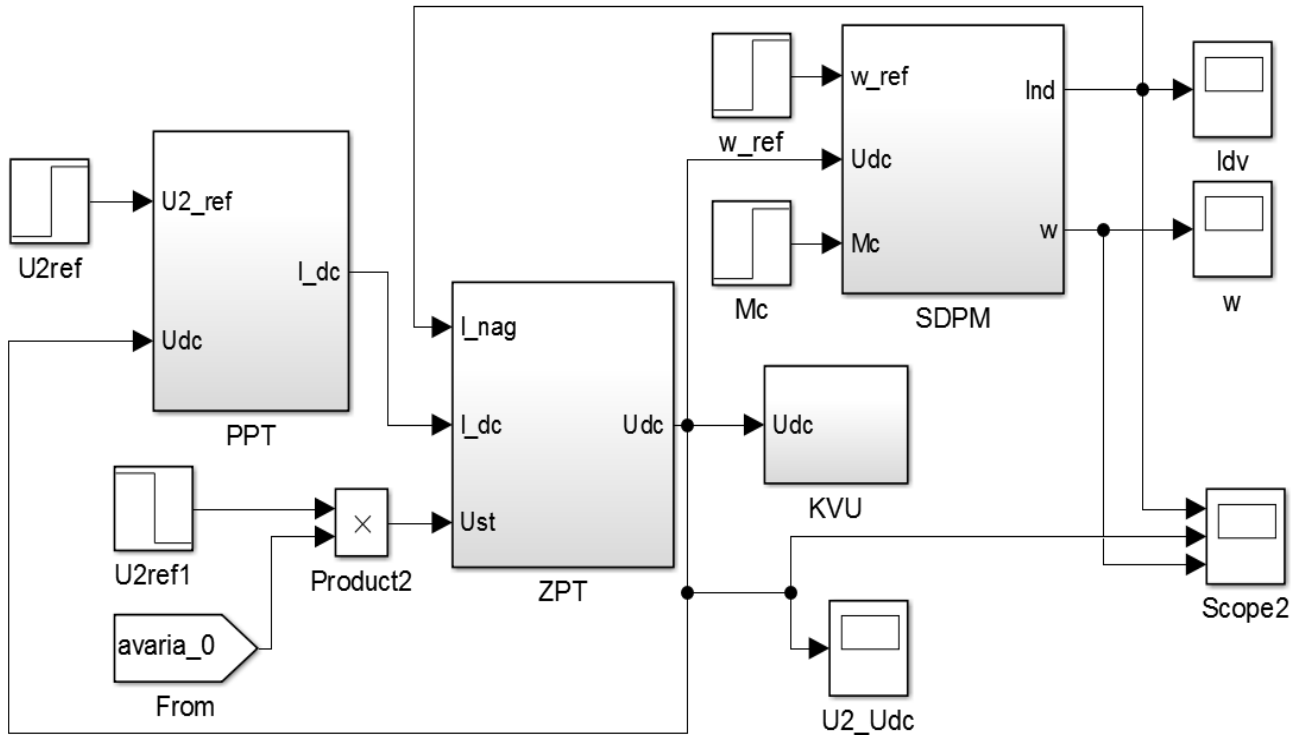


Рисунок А.1 – Модель частотно-регулируемого ЭП двойного электропитания

На рисунке А.2 представлена структура подсистемы ZPT (звена постоянного тока).

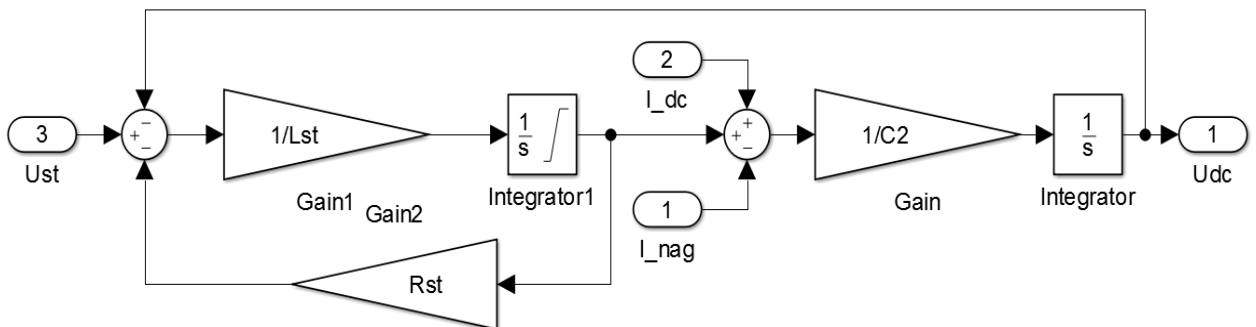


Рисунок А.2 – Структура подсистемы ZPT

На рисунке А.3 представлена структура подсистемы KVU (контроллера верхнего уровня).

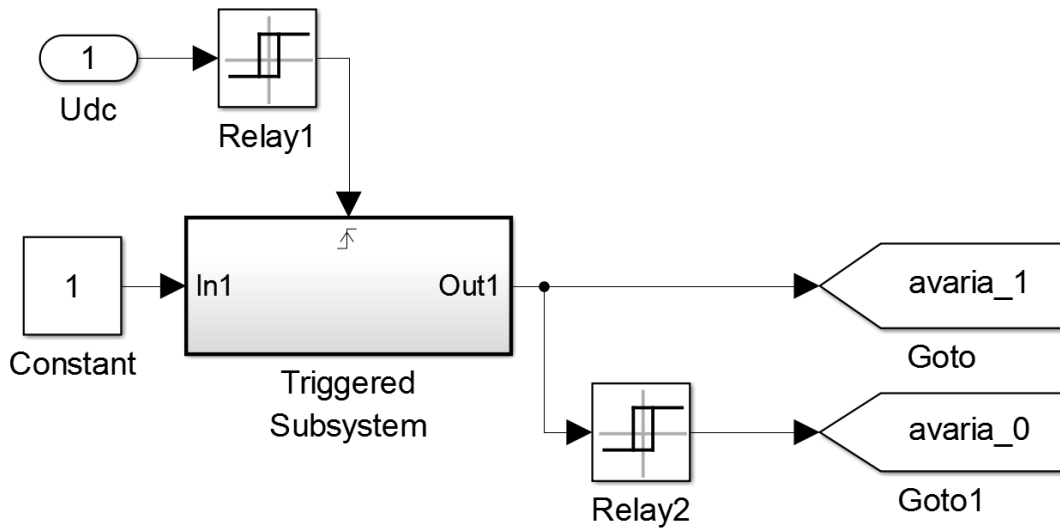


Рисунок А.3 – Структура подсистемы KVU

На рисунке А.4 представлена структура подсистемы SDPM (синхронного двигателя с постоянными магнитами).

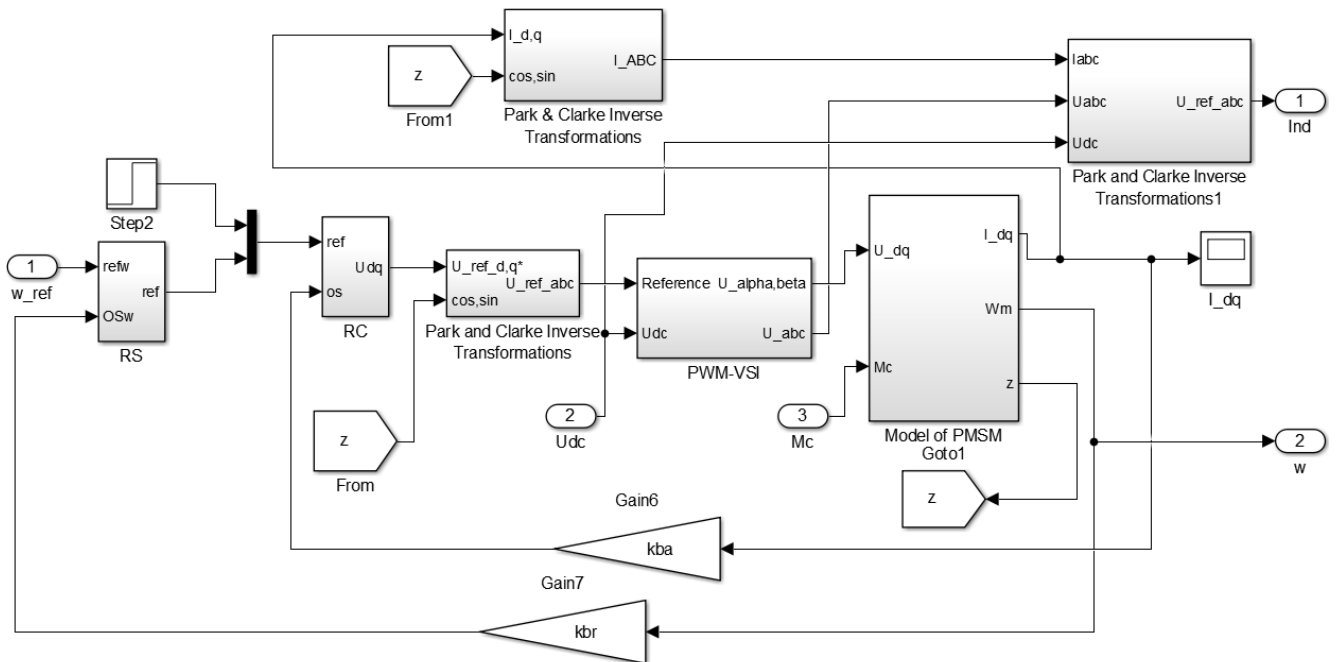


Рисунок А.4 – Структура подсистемы SDPM

На рисунке А.5 представлена структура подсистемы RS (регулятор скорости)

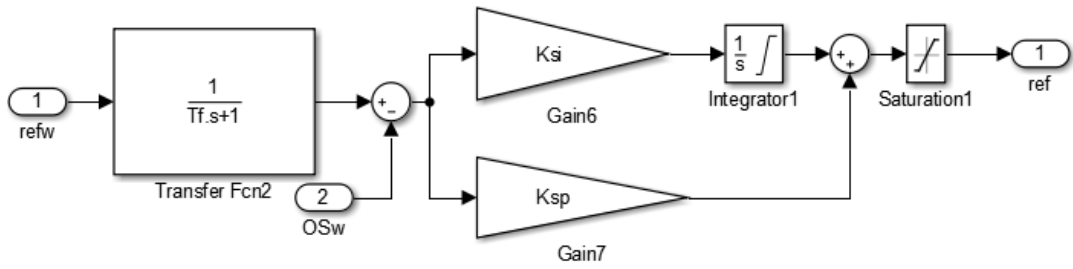


Рисунок А.5 – Структура подсистемы RS

На рисунке А.6 представлена структура подсистемы RC (регулятор тока)

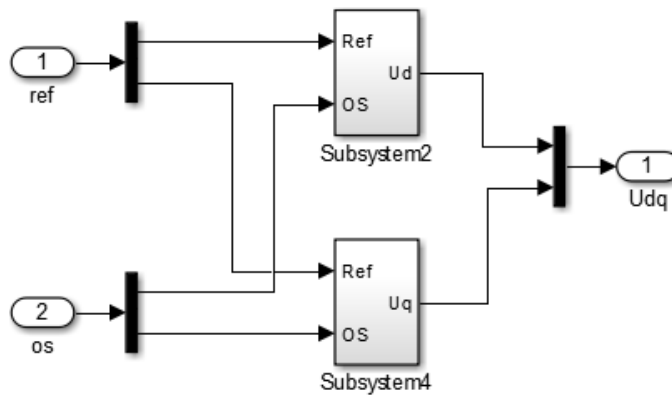


Рисунок А.6 – Структура подсистемы RC

На рисунке А.7 представлена структура подсистемы Model of SDPM (модель синхронного двигателя с постоянными магнитами)

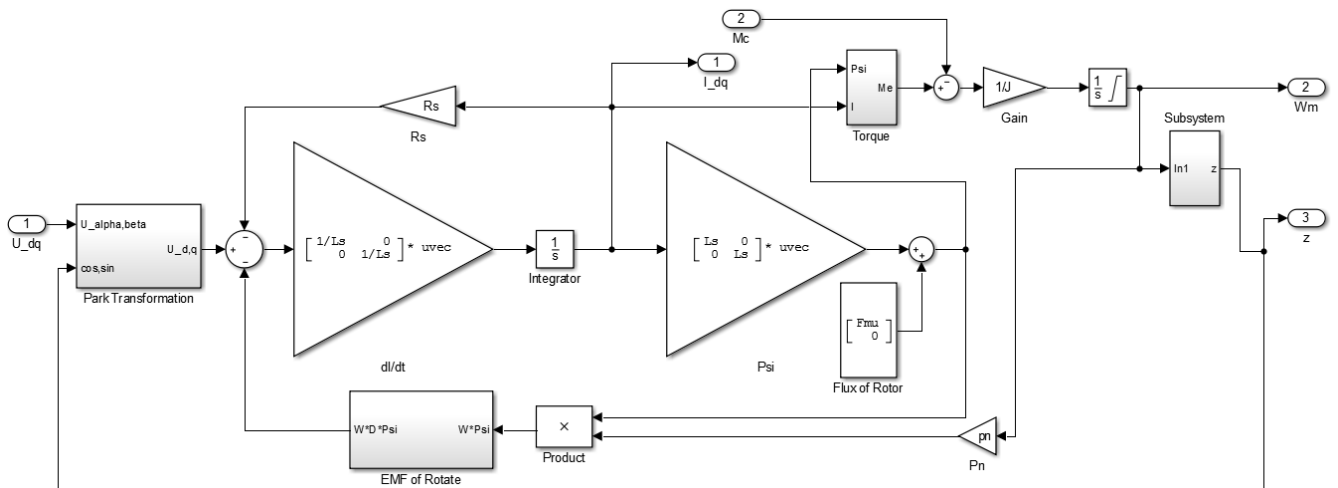


Рисунок А.7 – Структура подсистемы Model of SDPM

На рисунке А.8 представлена структура подсистемы PWM-VSI.

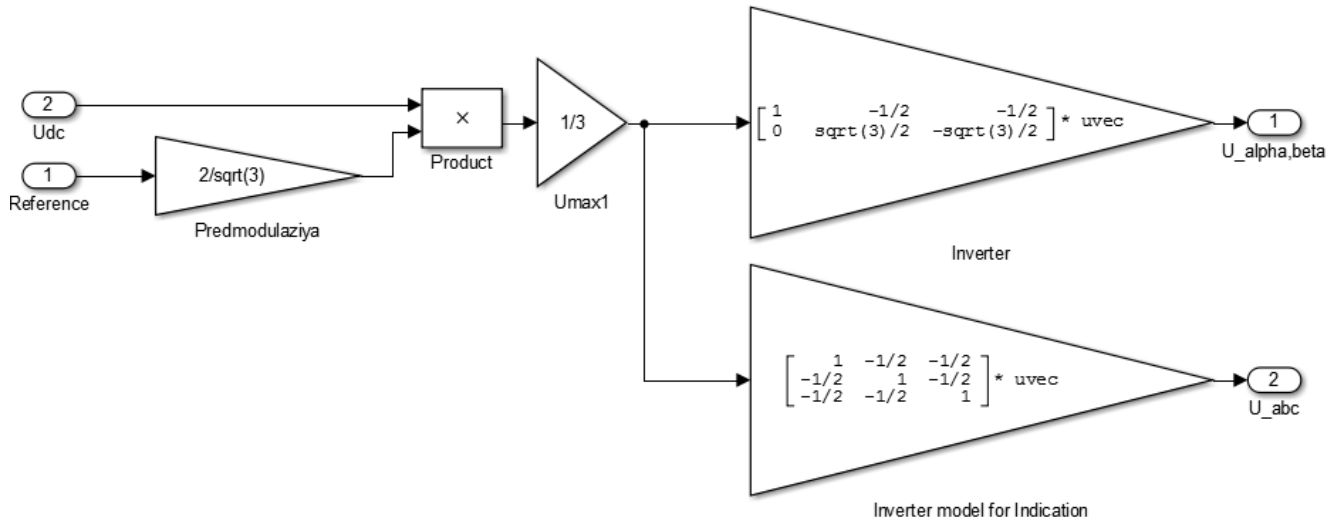


Рисунок А.8 – Структура подсистемы PWM-VSI

На рисунке А.9 представлена структура подсистемы PPT (гальванически развязанного двунаправленного преобразователя постоянного тока в постоянный).

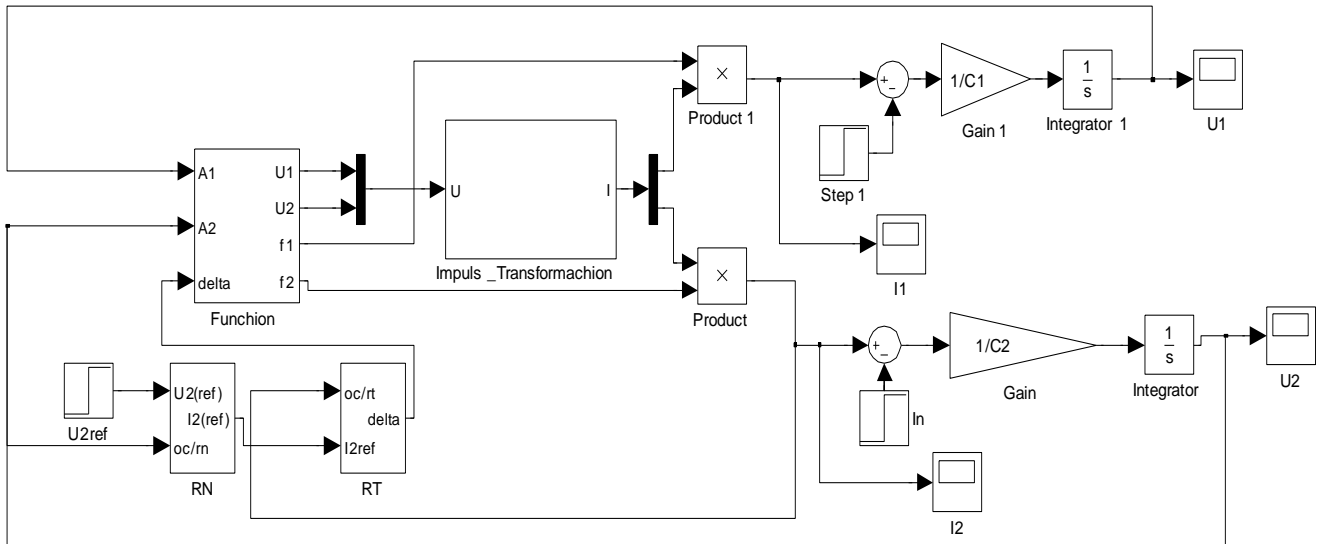


Рисунок А.9 – Структура подсистемы PPT

Структура подсистемы Function представлена на рисунке А.10.

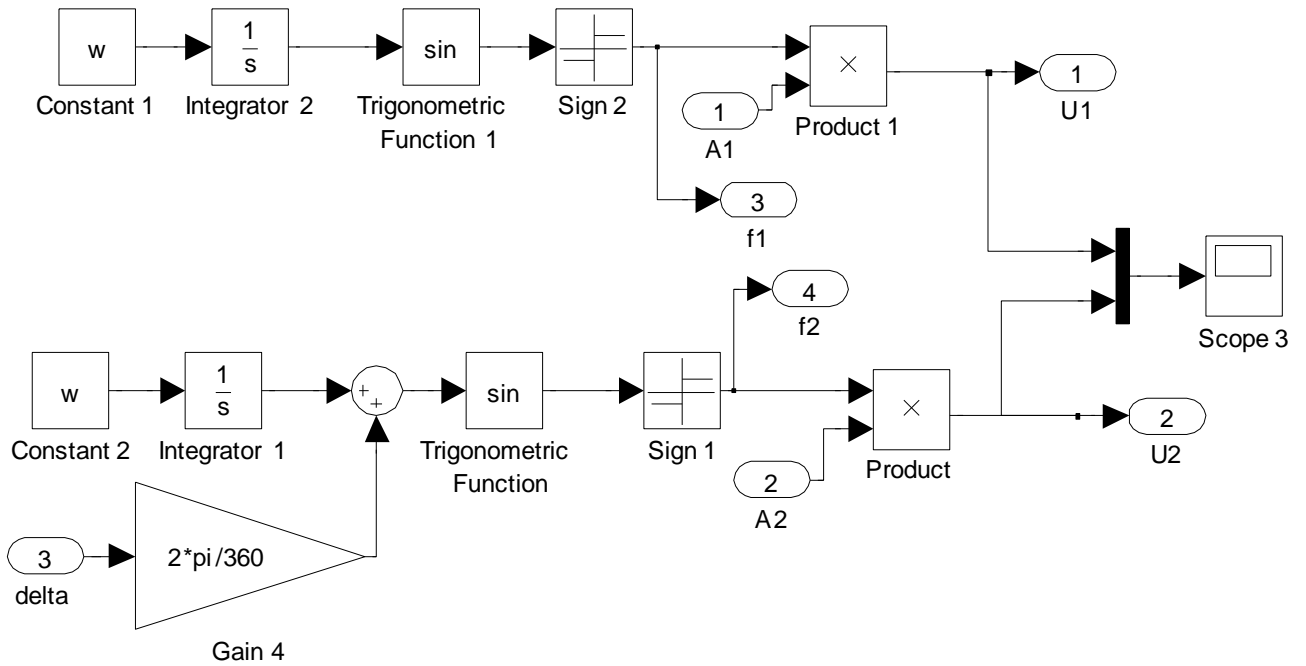


Рисунок А.10 – Структура подсистемы Function

На рисунке А.11 представлена структура подсистемы Impuls_Transformachion (импульсного трансформатора)

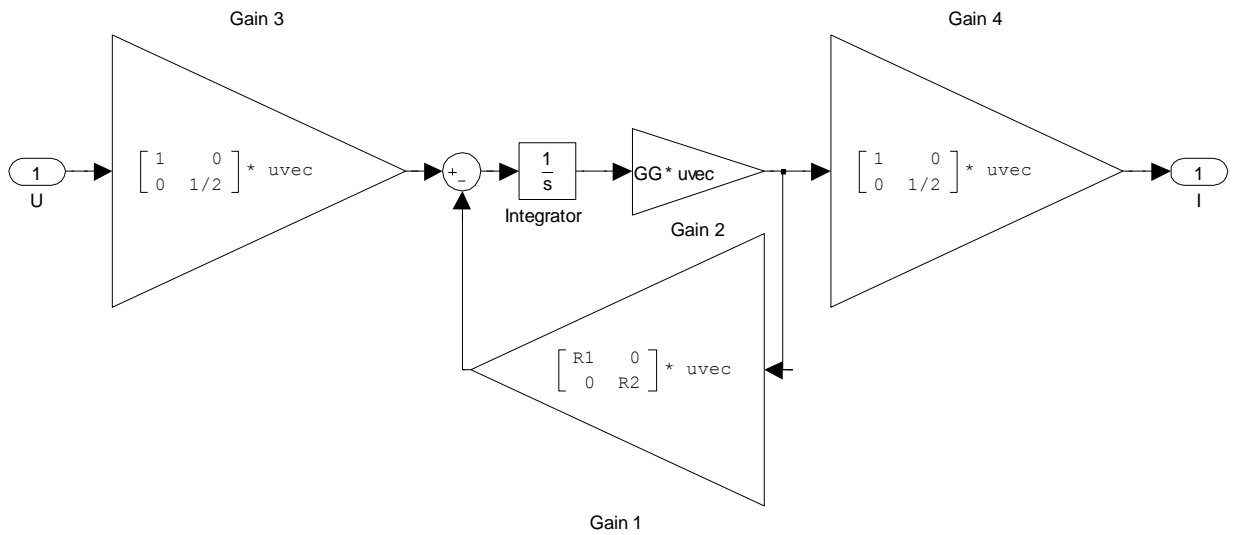


Рисунок А.11 – структура подсистемы Impuls_Transformachion

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример расчета коэффициентов регуляторов повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный и параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Основные параметры макетного образца повышающего ППТ представлены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Основные параметры макетного образца повышающего ППТ

Параметр ПППТ	Численное значение	Единица измерения
Номинальная мощность ПППТ	60	кВт
Входное напряжение	175–320	В
Выходное напряжение	540	В
Частота коммутации	6000	кГц
Емкость конденсаторов первичной стороны	6000	мкФ
Емкость конденсаторов вторичной стороны	6000	мкФ
Индуктивность дросселя	10	мкГн

Коэффициент интегральной части регулятора контура тока ППТ равен

$$k_{\text{И}} = \frac{\Omega_{\text{жел}}}{k_d k_{dI_2}} = \frac{1,89 \cdot 10^3}{238,54 \cdot 1} = 7,923 \text{ (о.е.)},$$

где $k_d = \frac{I_{2\text{H}}}{\gamma_{\text{H}}} = 238,54 \text{ (А/рад.)}$, $k_{dI_2} = 1 \text{ (о.е.)}$.

Коэффициент пропорциональной части регулятора контура напряжения равен

$$k_{\text{П}} = \frac{A_1 \Omega_{\text{H}} k_{\text{Э}}}{k_d U_2} = \frac{2 \cdot 94,25 \cdot 6000 \cdot 10^{-6}}{1} = 1,13 \text{ (о.е.)},$$

где для монотонного переходного процесса коэффициент формы был принят $A_1 = 2$; $\Omega_H = 94,25$ (Гц) – частота нормированного полинома; $k_э = k_{dI_2} C$ – эквивалентный коэффициент, $k_{dU_2} = 1$ (о.е.).

Коэффициент интегральной части равен

$$k_{и} = \frac{\Omega_H^2 k_э}{k_{dU_2}} = \frac{94,25^2 \cdot 6000 \cdot 10^{-6}}{1} = 53,30 \text{ (о.е.)}.$$

В таблице Б.2 приведены параметры Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя 4А225М4У3 [55].

Таблица Б.2. – Параметры Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя 4А225М4У3

$P_{2н}$ кВт	p_n	кпд ном., %	$\cos\varphi$ ном.	s_k , %	s ном., %	J кгм ²	X_m о.е.	R'_1 о.е.	X'_1 О.е.	R''_2 о.е.	X''_2 о.е.
55	2	92.5	0.9	10	1.4	0.8	4.2	0.027	0.086	0.015	0.14

Для удобства расчета параметров электродвигателя необходимо перейти от Г-образной схемы замещения (рисунок Б.1) к Т-образной схеме замещения (рисунок Б.2) и перейти от относительных величин к абсолютным величинам.

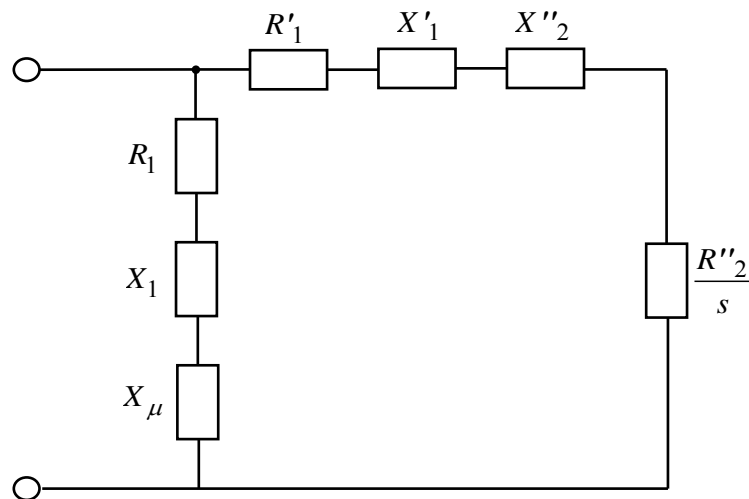


Рисунок Б.1 – Г-образная схема замещения АДКЗР

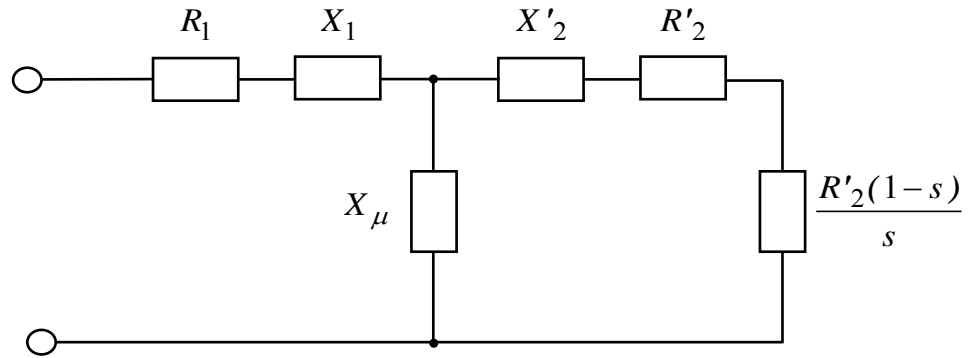


Рисунок Б.2 – Т-образная схема замещения

На рисунке были приняты следующие обозначения: R_1 , X_1 – элементы статора ($1=s$); R_2 , X_2 – элементы ротора ($2=r$); X_μ – главная индуктивность.

Для перехода к Т-образной схеме замещения необходимо ввести коэффициент пересчета C

$$C = \frac{X'_1}{X_1} = 1,024,$$

$$\text{где } X_1 = \frac{\sqrt{X_\mu^2 + 4X'_1 X_\mu} - X_\mu}{2} = 0,084 \text{ (о.е.)}$$

Тогда активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = \frac{R'_1}{C} = 0,026 \text{ (о.е.)}$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора

$$R'_2 = \frac{R''_2}{C^2} = 0,014 \text{ (о.е.)}$$

Реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора

$$X'_2 = \frac{X''_2}{C^2} = 0,133 \text{ (о.е.)}$$

Для перехода от относительных единиц к абсолютным единицам, необходимо найти коэффициент пересчета значений активных и реактивных сопротивлений исследуемой машины

$$k_{\Pi} = \frac{U_{SH}}{I_{SH}} = 2,2 \text{ (Ом)},$$

где $I_{сН} = \frac{P_{2Н}}{3U_{сН} \cos\varphi_H \eta_H} = 100.1 \text{ (А)}$.

Тогда, численные значения сопротивлений двигателя в Омах:

а) Активное сопротивление обмотки статора – $R_s = k_{\Pi} R_1 = 0.058 \text{ (Ом)}$;

б) Реактивное сопротивление обмотки статора – $x_1 = k_{\Pi} X_1 = 0.185 \text{ (Ом)}$;

в) Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотки статора (далее R_r'): $R_r' = k_{\Pi} R_2' = 0.031 \text{ (Ом)}$;

г) Реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора – $x_2' = k_{\Pi} X_2' = 0.293 \text{ (Ом)}$;

д) Сопротивление взаимоиндукции обмоток статора и ротора – $x_m = k_{\Pi} X_m = 9.24 \text{ (Ом)}$.

Индуктивности рассеяния и взаимоиндукции обмоток статора и ротора (в дальнейших расчетах будем считать их неизменными):

а) Индуктивность рассеяния обмотки статора – $L_{\sigma s} = \frac{x_1}{2\pi f_H} = 0.59 \text{ (мГн)}$;

б) Индуктивность рассеяния обмотки ротора – $L_{\sigma r} = \frac{x_2'}{2\pi f_H} = 0.93 \text{ (мГн)}$;

в) Индуктивность взаимоиндукции обмоток статора и ротора – $L_m = \frac{x_m}{2\pi f_H} = 29.4 \text{ (мГн)}$;

г) Суммарная индуктивность обмотки статора – $L_s = L_{\sigma s} + L_m = 29.99 \text{ (мГн)}$;

д) Суммарная индуктивность обмотки ротора – $L_r = L_{\sigma r} + L_m = 30.33 \text{ (мГн)}$;

е) Коэффициент взаимоиндукции – $L_{\sigma e} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} = 1.49 \text{ (мГн)}$.

Определим все фазные величины, для номинального режима используя Т-образную схему замещения.

Полное комплексное сопротивление фазы двигателя

$$\bar{Z}_{\text{НОМ}} = jX_s + \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{s_{\text{НОМ}}} + jX_r \right)}{jX_m + \frac{R_r}{s_{\text{НОМ}}} + jX_r} = 2,27e^{j24,6^\circ} \text{ (Ом)}.$$

Номинальный комплексный ток фазы статора

$$\bar{I}_{s.\text{НОМ}} = \frac{\bar{U}_{s.\text{НОМ}}}{\bar{Z}_{\text{НОМ}}} = 136,7e^{j(-24,6^\circ)} \text{ (А)}.$$

Действующее значение тока статора

$$I_{s.\text{НОМ}} = \frac{136,7}{\sqrt{2}} = 96,6 \text{ (А)}.$$

Номинальный комплексный ток фазы ротора

$$\bar{I}_{r.\text{НОМ}} = \bar{I}_{s.\text{НОМ}} \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R_r}{s_{\text{НОМ}}} + jX_r} = 128,8e^{j(-11,3^\circ)} \text{ (А)}.$$

Действующее значение тока ротора

$$I_{r.\text{НОМ}} = \frac{128,8}{\sqrt{2}} = 91,1 \text{ (А)}.$$

Электромагнитный момент на валу машины, определенный по Т-образной схеме замещения

$$M_{\text{н.эм}} = \frac{3I_{r.\text{н}}^2 R_r}{\omega_0 s_{\text{НОМ}}} = 358,6 \text{ (Н·м)}.$$

Потокосцепление ротора в номинальном режиме

$$\bar{\psi}_{r.\text{н}} = L_r \bar{I}_{r.\text{НОМ}} + L_m \bar{I}_{s.\text{НОМ}} = 0,928e^{j258,7^\circ} \text{ (В·с)}.$$

Амплитуда номинального потокосцепления ротора

$$\psi_{r.\text{н}} = 0,928 \text{ (В·с)}.$$

На рисунке Б.3 представлена цифровая модель частотно-регулируемого электропривода двойного электропитания, работающего согласно принципам теплового резервирования с замещением.

На рисунке Б.5 представлена структура подсистемы Logic1 (контроллер верхнего уровня)

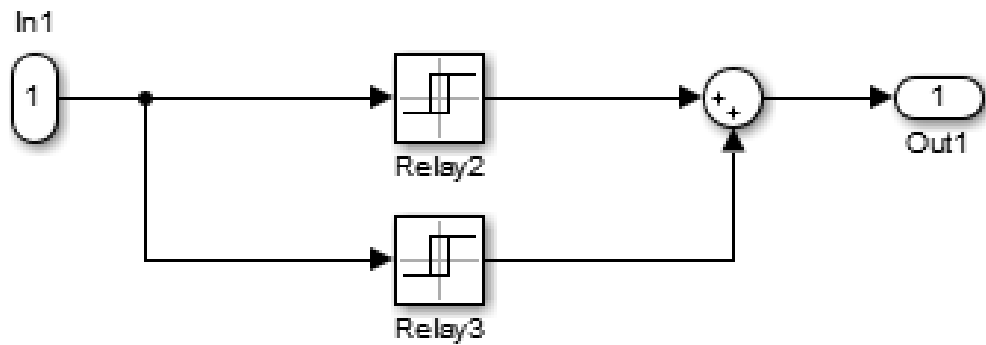


Рисунок Б.5 – Структура подсистемы Logic1

На рисунке Б.6 представлена структура подсистемы AD_KZR (Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат)

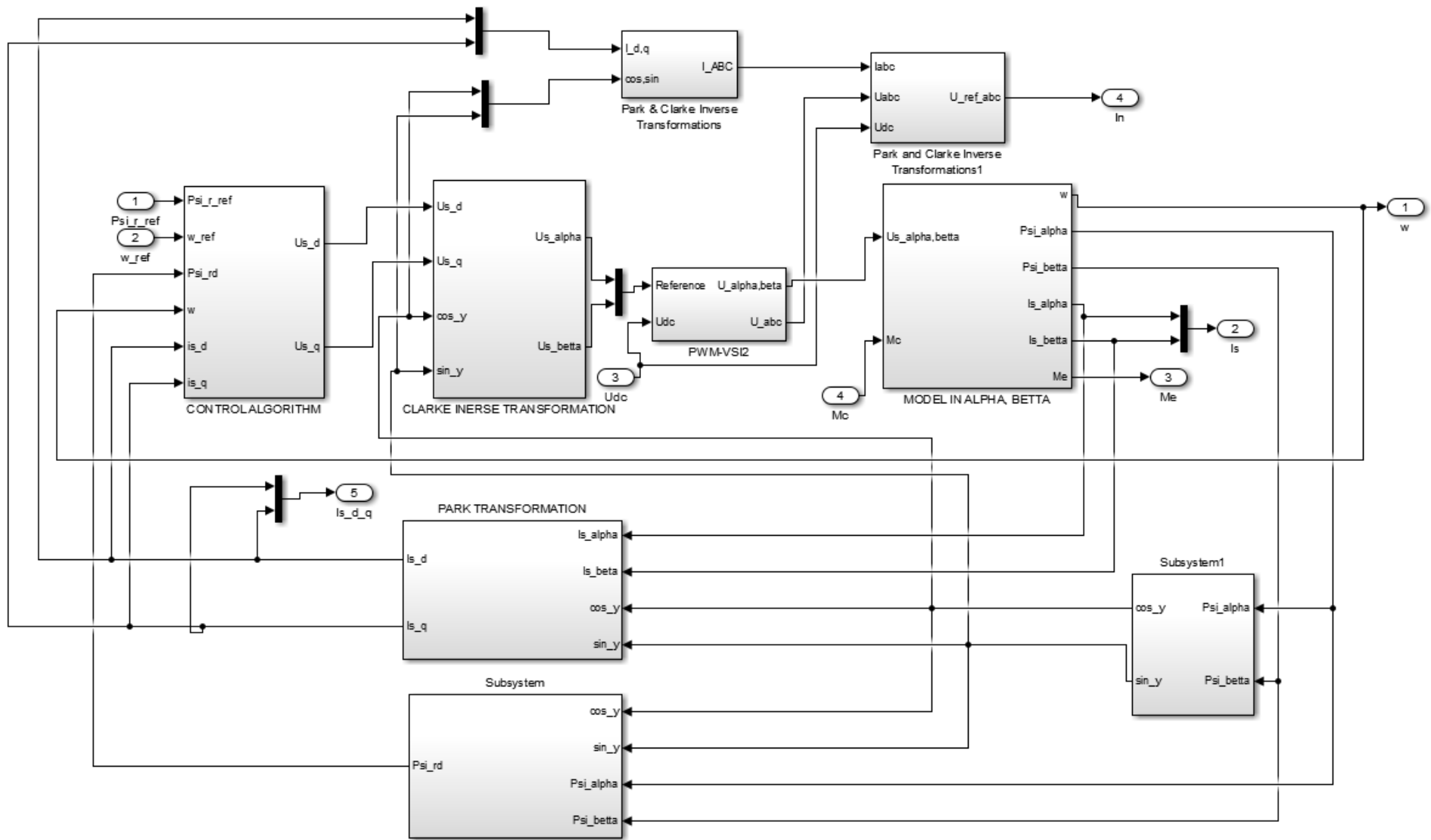


Рисунок Б.6 – Структура подсистемы AD_KZ

На рисунке Б.7 представлена структура подсистемы Model in alpha, beta (асинхронного двигателя в системе координат α, β).

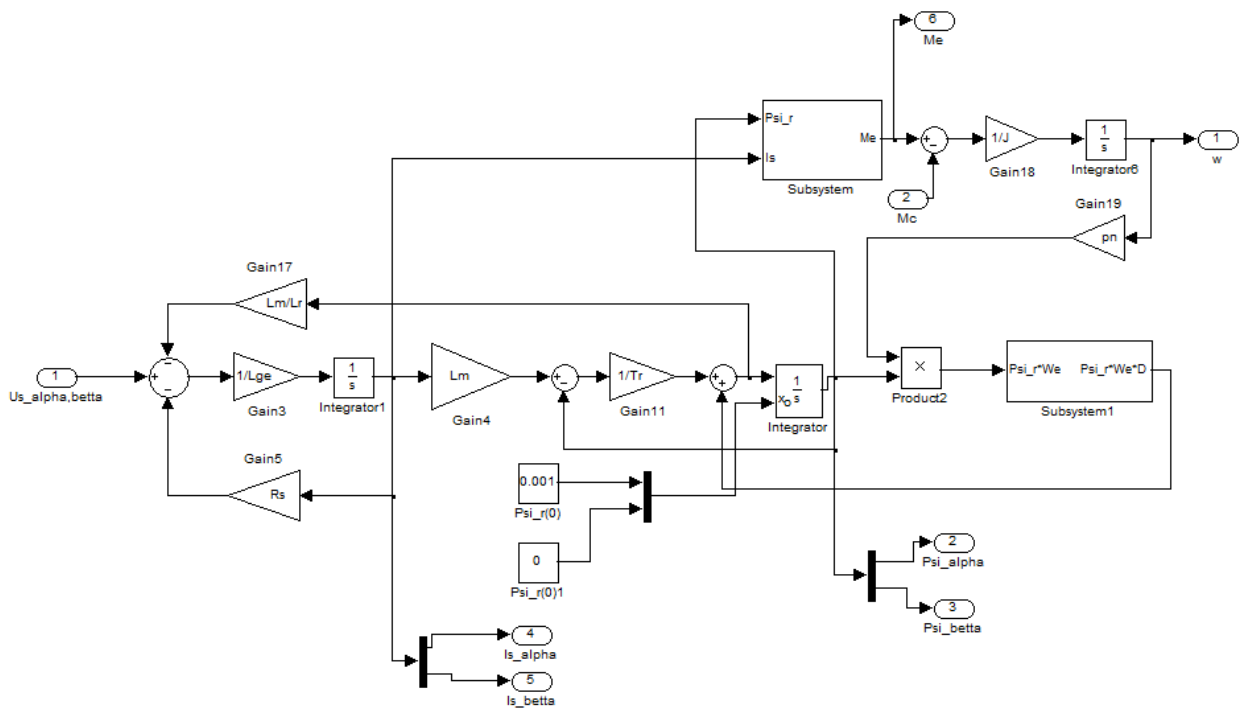


Рисунок Б.7 – Структура подсистемы Model in alpha, beta

На рисунке Б.8 представлена структура подсистемы Control Algorithm (регулятор тока, потока и скорости АДКЗР)

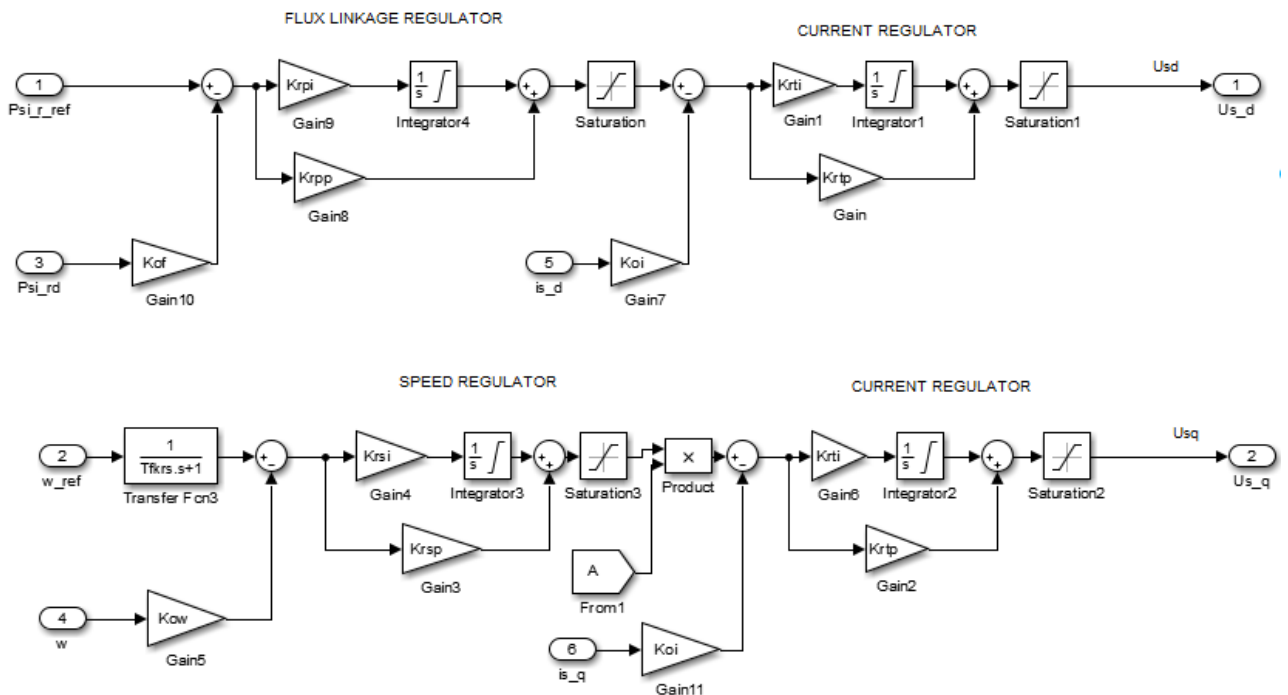


Рисунок Б.8 – Структура подсистемы Control Algorithm

На рисунке Б.9 представлена структура подсистемы РРРТ (Повышающий ППТ)

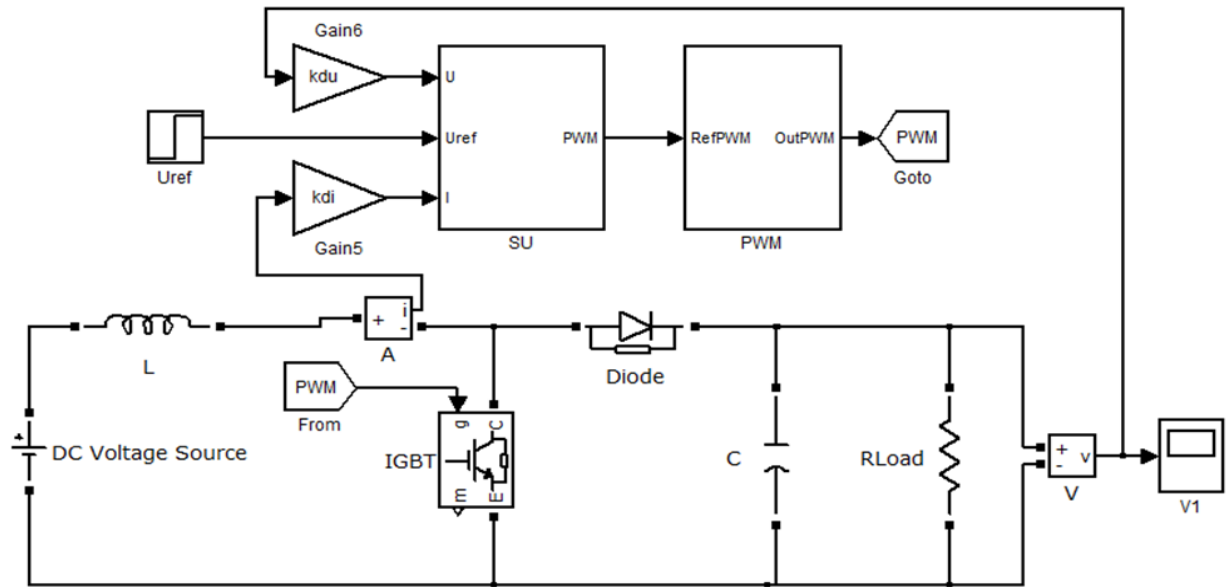


Рисунок Б.9 – Структура подсистемы РРРТ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Цифровая модель алгоритма динамической коррекции

Цифровая модель ЭП, работающего совместно с системой управления ППТ и алгоритмом динамической коррекции представлена на рисунке В.1.

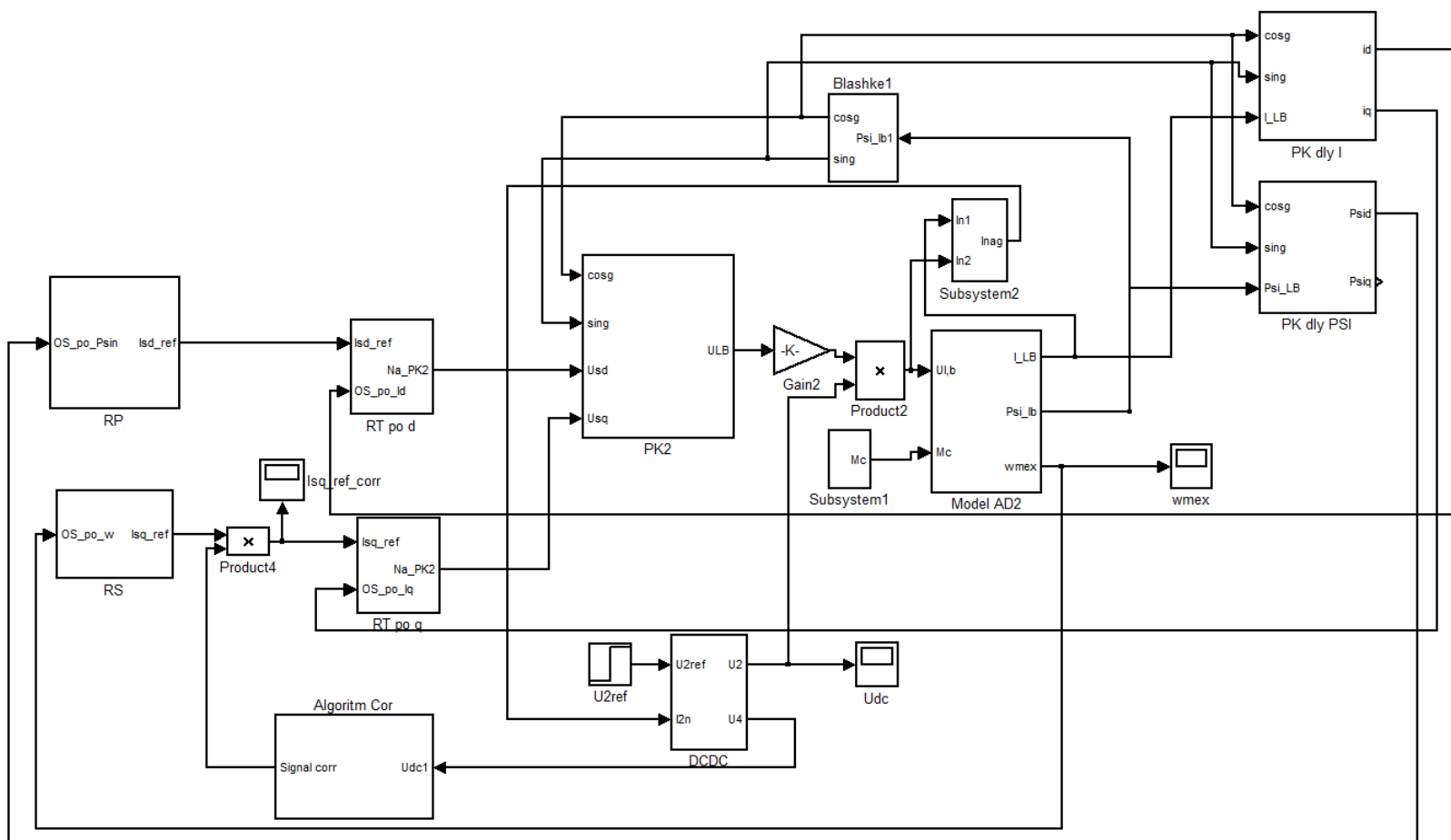


Рисунок В.1 – Цифровая модель ЭП, работающего совместно с системой управления ППТ и алгоритмом динамической коррекции

Алгоритм динамической коррекции представлен на рисунке В.2 (Algorithm Cor).

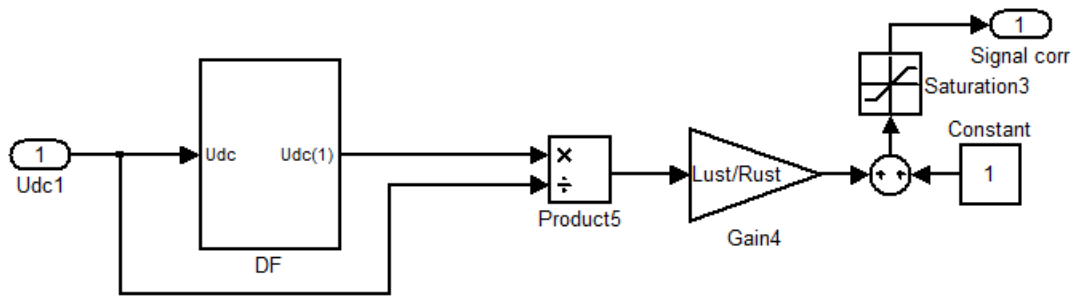


Рисунок В.2 – Алгоритм динамической коррекции

На рисунке В.3 представлена структура подсистемы DF (дифференцирующий фильтр).

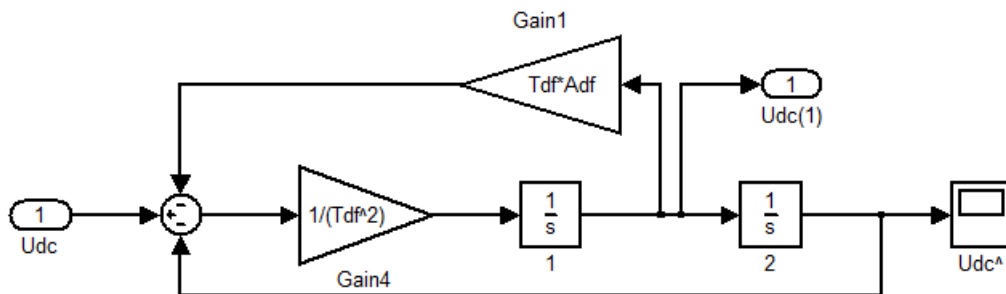


Рисунок В.3 – Структура подсистемы DF

ПРИЛОЖЕНИЕ Г**Акты внедрения научных результатов диссертации****“УТВЕРЖДАЮ”**

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»
доктор технических наук, доцент

С.В. Брованов

_____ 2018 г.


**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы Вислогузова Д.П.
«Алгоритмы управления частотно-регулируемыми электроприводами с
функцией резервного электропитания от сети постоянного тока»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ) Новосибирского государственного технического университета Вислогузова Дениса Петровича, в том числе алгоритмы управления преобразователем частоты двойного электропитания, используются в учебном процессе кафедры ЭАПУ НГТУ:


- 1) при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Автоматическое управление системами мехатроники» 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

Россия, 630088, г. Новосибирск,
ул. Сибиряков-Гвардейцев, 51/3
<http://www.erasib.ru>
тел.: (383) 344-87-40, 344-88-46, 344-85-77, факс: 342-84-90
e-mail: erasib@erasib.ru



Система менеджмента качества соответствует ГОСТ РВ 0015-002-2012 и ГОСТ ISO 9001-2011
Система добровольной сертификации «Военный регистр»

Сертификат соответствия № ВР 02.1.10256-2016

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Вислогузова Д. П.
«Алгоритмы управления частотно-регулируемыми электроприводами с функцией
резервного электропитания от сети постоянного тока»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационного исследования, выполненного Вислогузовым Денисом Петровичем, используются ЗАО «ЭРАСИБ» (ранее – Специальное конструкторско-техническое бюро автоматизации тяжелого металлорежущего оборудования СКТБ АТМО, г. Новосибирск) в преобразователях частоты двойного электропитания (от сети переменного и постоянного тока).

В частности, ЗАО «ЭРАСИБ» приняло к внедрению:

- функциональные схемы построения частотно регулируемых электроприводов двойного электропитания;
- алгоритм управления двунаправленным гальванически развязанным преобразователем постоянного тока в постоянный;
- безударный рекуперативный алгоритм управления преобразователем частоты двойного электропитания.

Применение вышеперечисленных результатов позволит использовать преобразователи частоты двойного электропитания в электроприводах, работающие на ответственных объектах, тем самым повысив их надежность.

Генеральный директор
ЗАО «ЭРАСИБ»



Клан

В. А. Клан

16.05.18