

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

РОЗАЕВ ИВАН АНДРЕЕВИЧ

**АЛГОРИТМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор Г.И. Однокопылов

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Отечественный и зарубежный опыт разработок систем управления ВИП, области его применения.	13
1.2. Обзор схмотехнических решений в зарубежной литературе.	15
Выводы по главе 1	17
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	18
2.1. Математическая модель отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода.....	18
2.2. Математическая модель отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода в составе насоса добычи нефти	28
2.3. Математическая модель транспортного средства с исполнительным отказоустойчивым вентильно-индукторным электроприводом	32
2.4. Математическая модель многосекционного отказоустойчивого вентильно- индукторного электропривода.....	39
2.5. Имитационное моделирование отказоустойчивого вентильно- индукторного электропривода.....	43
2.5.1. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода.....	43
2.5.2. Имитационная модель отказоустойчивого двухсекционного трехфазного вентильно-индукторного электропривода.	56
2.5.3. Имитационная модель ЭЦН на базе ВИП.....	61
2.5.4. Имитационная модель ТС	65
Выводы по главе 2.....	69

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ МОНИТОРИНГА И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.	70
3.1. Алгоритм мониторинга фазных токов вентильно-индукторного электродвигателя и формирование матриц отказов.	70
3.2. Алгоритмы отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных режимах работы	74
3.2.1. Алгоритм управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет применения угла перекрытия фаз.....	75
3.2.2. Алгоритм управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз	78
3.2.3. Алгоритм управления двухсекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз	82
3.3. Оценка остаточного рабочего ресурса.....	89
3.4. Алгоритмы отказоустойчивого управления в ЭЦН с ВИД	90
3.5. Алгоритмы отказоустойчивого управления в транспортном средстве	96
Выводы по главе 3.....	105
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВИД	106
4.1. Алгоритм бездатчикового управления ВИД в аварийном режиме работы	106
4.2. Отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод насоса добычи или транспортировки нефти.....	110
4.2.1. Математическая модель бездатчикового вентильно-индукторного электродвигателя насоса добычи нефти в аварийном режиме работы.	111
4.2.2. Алгоритмы бездатчикового отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электродвигателем насоса для добычи нефти.	114
4.2.3. Имитационная модель бездатчикового отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса добычи нефти.	116

4.3. Результаты моделирования.	118
Выводы по главе 4.....	121
ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ	
ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЭЛЕКТРОПРИВДА.....	122
5.1. Разработка преобразователя для коммутации обмоток ВИД.....	123
5.1.1. Принцип работы ячейки, обеспечивающей работу и диагностику состояния вентильно-индукторного двигателя	126
5.2. Функциональная схема отказоустойчивого двухсекционного вентильно- индукторного электропривода.....	128
5.2.1. Описание работы функциональной схемы.	130
5.3. Разработка стенда для исследования ВИП.	133
5.3.1. Анализ технологического процесса эксперимента и технологического оборудования как объекта исследования	133
5.3.2. Иерархия уровней АСУ технологическим экспериментом.....	136
Выводы по главе 5:.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	142
Приложение А. Акт внедрения «Мехатроника-Софт».....	158
Приложение Б. Акт внедрения ОЭЭ ИШЭ ТПУ	159
Приложение В. Медаль РАН.....	160

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большую популярность приобретают современные электропривода с возможностью высокоточного регулирования, одним из таких является вентильно-индукторный электропривод, который благодаря простоте, высоким энергетическим показателям и большому диапазону регулирования находит все большее применение в составе различных производственных механизмов. Такой электропривод благодаря особенностям конструкции и простоте реализации управления может найти применение во многих сферах промышленности таких как военная, медицинская, нефтедобывающая, космическая и многие другие, где предъявляются высокие требования по отказоустойчивости рабочего механизма. Целью данной работы является показать особенности алгоритмического управления вентильно-индукторным электроприводом со стороны его отказоустойчивости, надежности и живучести. В реалиях современной Российской Федерации 2022 года с учетом растущего числа санкционных ограничений от ряда ведущих мировых держав становится все более актуальным импортозамещение и реализация отечественных надежных систем с повышенным требованием к безостановочному циклу производства и транспортировки ресурсов. Отказоустойчивые системы управления позволят продолжить функционирование электропривода производственного механизма в аварийной ситуации без остановки производства и необходимости срочного ремонта. Рассмотренные в работе алгоритмы управления не требуют конструктивных изменений и могут быть встроены в существующие системы управления. Документом, подтверждающим востребованность в развитии комплексов с безопасным и надежным электроприводом, является: «Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 N 1662-р (ред. от 08.08.2009) «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития развитие промышленности и строительства»», в котором определен рост потребности в транспортной технике с высокой степенью надежности и безотказной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Большинство современных промышленных объектов имеет в своем составе управляемый электропривод (ЭП). Отказ такого механизма на производстве с длительным или безостановочным циклом изготовления или добычи продукции может привести к остановке производства в связи с невозможностью полноценного функционирования механизмов. На сегодняшний день значительное внимание уделяется электроприводам в составе производственных комплексов, работающих со стратегически значимыми для страны ресурсами, такими как нефть и газ, а также с потенциально опасными ракетными, авиационными системами, системами жизнеобеспечения и транспортировки. Требуется уделить особое значение их отказоустойчивости, живучести и надежности с учетом их потенциальной значимости. В таких комплексах в качестве исполнительного электродвигателя возможно применение вентильно-индукторных электродвигателей (ВИД) различного исполнения. Установка электроприводов на базе ВИД может значительно улучшить технологический процесс и обеспечить отказоустойчивость и безопасность промышленных систем, повысить энергетические показатели.

Целесообразно применение вентильно-индукторного электропривода (ВИП) в автомобильном транспорте в составе гибридных силовых установок. В нефтедобыче отказ исполнительного двигателя приводит к остановке производства и, как следствие, к значительным экономическим потерям.

Для решения задач по обеспечению эксплуатационной живучести и увеличения рабочего ресурса таких производственных объектов значительно возрастает роль разработки и внедрения отказоустойчивого алгоритмического управления исполнительными электродвигателями. Вопросы построения отказоустойчивых электроприводов рассмотрены в работах российских и зарубежных ученых: В.А.Кузнецова, В.А.Кузьмичева, П.Г.Вигриянова, П.О.Шабурова, Г.К.Птаха, В.Ф.Козаченко, М.М.Лашкевича, В.В. Агафонова,

В.Н.Острирова, А.М. Русакова, Д.Е.Корпусова, Д.И.Алямкина, А.В. Дроздова, Г.И.Однокопылова, И.Ф.Нугаева, А.П.Темирёва, С.В.Александровского, Д.М.Глухова, Ю.Н.Митрофаненкова и других, зарубежных ученых: Nguyen Kuang Kkhoa, Miller T. J., Krishnan R., Sangshin Kwan, Hamid A. Toliyat, Ruba M., Anders M., Thomas M. Jahns, Irimia N.D., Simon A., Rolf Isermann, Gerling D., Schramm A. Jen-Ren Fu, Thomas A., Lipo Brian, A. Welchko, Yihua Hu, Chun Gan, Wenping Cao, Stephen Finney, M. R. Feyzi, Y. Ebrahimi и других.

Диссертационная работа направлена на разработку алгоритмов отказоустойчивого управления ВИП производственных объектов.

Объект исследований: вентильно-индукторный электропривод в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Предмет исследований: математическое и алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Цель работы: разработка алгоритмов отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом производственных объектов.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Разработать математическую и имитационную модели вентильно-индукторного электропривода в штатных и аварийных режимах работы электроцентробежного насоса (ЭЦН) и транспортного средства (ТС) с вентильно-индукторным электроприводом.

2. Разработать и исследовать алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазных вентильно-индукторных электроприводов при однократных и множественных отказах.

3. Разработать математическую и имитационную модели бездатчикового ВИП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Методы исследования. В работе применены: положения основ математической теории электрических машин; численные методы,

используемые при описании динамических электрических, механических и магнитных процессов; математическое моделирование и программирование в среде Matlab Simulink, C++; тепловой расчет электродвигателя в среде Motor-CAD; численные методы Эйлера и Рунге-Кутты 4 порядка; методы цифровой фильтрации сигналов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая и имитационная модели вентильно-индукторного электропривода в штатных и аварийных режимах работы ЭЦН и ТС с ВИД.
2. Алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазных ВИП в составе производственных объектов при однократных и множественных отказах.
3. Математическая и имитационная модели бездатчикового ВИП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением математических методов и моделей, адекватность которых по отношению к реальным процессам подтверждена результатами теоретических и компьютерно-имитационных исследований в программной среде Matlab; сравнением результатов моделирования с имеющимися наработками отечественных и зарубежных ученых.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Созданы математическая и имитационная модель установки электроцентробежного насоса и транспортного средства с отказоустойчивым вентильно-индукторным электродвигателем в качестве исполнительного двигателя и мотор-колеса (МК) в аварийных и неполнофазных режимах работы.
2. Выполнены исследования алгоритмов отказоустойчивого управления, позволяющие частично или полностью восстановить работоспособность трехфазных ВИП при однократных и множественных отказах, в том числе и для случая многосекционного исполнения обмоток статора ВИП.

3. Разработаны математическая и имитационная модели бездатчикового ВВП насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы позволяющая подтвердить работоспособность предложенного алгоритма отказоустойчивого управления.

Практическая ценность работы.

1. Разработана методика диагностики и алгоритмического восстановления работоспособности вентильно-индукторного электропривода [1-3,6].

2. Разработаны технические решения по построению отказоустойчивых мостовых и полумостовых преобразовательных ячеек с защитными элементами блокирования отказов [9, 10].

3. Предложено схемное решение по построению отказоустойчивого вентильно-индукторного многосекционного электропривода с повышенной живучестью при множественных отказах [8].

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, приняты к внедрению ООО «Мехатроника-Софт» (г. Томск), а также используются в учебном процессе отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики Томского политехнического университета (НИ ТПУ).

Личный вклад автора. Все основные научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в публикациях автором разработаны и сформулированы принципы отказоустойчивого управления [1-3, 16-18, 20], математические модели отказоустойчивых электроприводов [4-7, 11-15, 18] и алгоритмическое управление с целью восстановления полной или частичной работоспособности [9, 10, 22-32], технические решения по реализации отказоустойчивого управления [8-13]. Автор участвовал в разработке программных средств, в проведении и анализе результатов исследований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 05.09.03 «Электротехнические

комплексы и системы» в диссертации содержатся теоретические и экспериментальные исследования в соответствии с пунктом 3, позволившие разработать алгоритмы восстановления работоспособности в реальном времени для ВИП; в соответствии с пунктом 4, исследовать работоспособность и оценить качество функционирования ВИП при отказах силовых цепей с восстановлением полной или частичной работоспособности.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались: на научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», ОАО «НПЦ Полус», г. Томск, 2013г., 2015г.; на VI международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2013г.; на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2013 г.; на международной научно-технической конференции «Науки о Земле: современное состояние и приоритеты развития», г. Дубай (ОАЭ), 2013 г.; на I международной научно-технической конференции «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», г. Йошкар-Ола, 2013 г.; на всероссийской конференции «Введение в энергетику», г. Кемерово, 2014 г.; на научном форуме «Инженеры будущего», г. Уфа, 2014 г.; на международной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, в социальной сфере и медицине», г. Томск, 2014 г.; на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2014 г.; на конференции «20th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Techniques and Technologies», г. Томск, 2014 г.; на конференции «International Siberian conference on control and communications», г. Омск, 2015 г.; на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», г. Иркутск, 2015 г.; на стратегическом форуме «11th International Forum on Strategic Technology», г. Новосибирск, 2016 г.; на IV международном молодежном форуме

«Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2016 г.; всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», Кемерово, 2018 г. В Павлодарском государственном университете им. С. Торайгырова (ПГУ) в 2020 г. На научно-технических семинарах инженерной школы энергетики (ИШЭ) ТПУ в 2015-2022 гг.

Публикации. Основные положения диссертации, отражены в 32 печатных работах. Из них 5 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus/WoS, 2 статьи в издании из перечня рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на изобретение, 5 патентов РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Работа содержит 156 стр. основного текста, 86 рисунков, 6 таблиц и библиографический список из 143 наименований.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы замечен бурный рост зарубежных и отечественных исследований в области создания простых по конструкции и надежных электрических машин для электроприводов, где технологичность, простота, низкая цена и отказоустойчивость исполнительного двигателя имеют решающее значение, а требуемые показатели качества достигаются за счет применения высокоинтеллектуальных преобразователей частоты. Подобные исследования имеют решающее значение в особенности для промышленного оборудования опасных производственных объектов: ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, где возникает проблема организации отказоустойчивого управления исполнительными электроприводами (ЭП) с обеспечением свойства живучести. В работе показано, что при доработке системы управления и применении алгоритмов отказоустойчивого управления возможно значительно повысить отказоустойчивость и применимость вентильно-индукторного электродвигателя в различных производственных объектах, имеющих стратегическую значимость. Показано, что за счет использования исполнения ВИД без датчика положения ротора для насоса добычи нефти возможно избежать ошибок в математических вычислениях на основе мгновенных значений токов и напряжений при отказе фазы за счет смещения векторов потока. Ниже приведен краткий обзор существующих разработок по применению вентильно-идукторного электродвигателя в отечественной и зарубежной литературе.

1.1. Отечественный и зарубежный опыт разработок систем управления ВИП, области его применения.

Одними из первых публикаций зарубежных ученых по тематике вентильно-индукторного электропривода считаются работы E.R. Laithwaite [33], P.J. Lawrenson [34, 35] и других опубликованные в 60-е годы прошлого столетия. Позднее T.J. Miller [36] выпустил полный ряд материалов и учебных пособий по исследованию вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД), его конструктивных особенностях и базовых принципах управления.

Интерес к такому типу электропривода среди наших ученых появился позднее, ведь прежде двигатели с подобной магнитной системой рассматривались только как шаговые. Однако после 90-х годов ученые нашей страны занялись вопросом работы шагового электропривода в режиме синхронного вращения с получением непрерывного вращающего момента при условии специальной организации его питания. В настоящий момент значительная часть работ посвящена исследованиям, связанным с устранением известных значительных недостатков ВИД таких как: пульсации электромагнитного момента [37], высокий уровень акустического шума [38], низкая степень надежности, обусловленная большим количеством необходимых элементов для корректной работы двигателя (преобразователь частоты, датчик положения, выпрямитель и др.) [39-42].

Чаще всего рассматриваются трех-четырёх фазные электропривода. Однако ряд работ показывает, что рост числа фаз способствует значительному снижению пульсаций электромагнитного момента, однако снижает надежность [43, 44]. Ряд патентов посвящены конструкциям, вопросам пуска и реверса ВИД [45].

Существует ряд исследований, предлагающих внедрение вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) в качестве исполнительного двигателя насосного агрегата. Имеющиеся разработки преимущественно касаются конструктивных особенностей ВИД и его модернизации [46-49]. Однако, на

сегодняшний день ВИД не получил должного развития и серийного производства.

Широко распространено исследование ВИД применительно к сфере железнодорожного транспорта в тяговых электроприводах магистральных электровозов примером являются ряд российских работ [50-53] и зарубежных [54-56]. Рассмотрена возможность использования ВИП как тяговый электропривод рудничных электропоездов и электровозов [57]. Часть работ посвящена вопросам управления ВИП для электроподвижного состава. Большое количество работ посвящено сравнению ВИП с существующими и более распространенными исполнительными электродвигателями такими как синхронные, асинхронные и вентильные [58, 59]. Наиболее интересными сегодня видятся разработки систем мотор-колесо и гибридных установок на базе ВИД. Рассматриваются перспективы дальнейшего перехода транспорта с двигателей внутреннего сгорания на вентильно-индукторные машины [60-62].

Во многих работах рассматриваются вопросы питания ВИД от инверторов напряжения или независимых источников питания. Одним из примеров является вентильно-индукторный электродвигатель в системе ЖКХ с двумя независимыми источниками питания. Свойством электропривода, относящимся к повышению надёжности тепловодоснабжения, является его безостановочная работа при кратковременном нарушении электропитания. Это обеспечивается электропитанием секций электропривода от двух или более независимых вводов, одновременное нарушение в которых маловероятно [63]. Рассматриваются вопросы секционирования статорных обмоток [64, 65]. На сегодняшний день часто встречаются работы, посвященные устранению из состава ВИП датчика положения ротора и реализации бездатчикового алгоритмического управления с применением наблюдателей состояния [66-74].

С целью предотвращения аварийных отключений механизма предлагаются технические решения, которые позволяют продолжить работу электропривода после однократных или множественных отказов силовой части статорных

обмоток исполнительного двигателя [75-85]. Работы [86-91] посвящены математическому и имитационному моделированию ВИП.

Вопросы построения отказоустойчивых электроприводов рассмотрены в работах российских и зарубежных ученых: В.А.Кузнецова, В.А.Кузьмичева, П.Г.Вигриянова, П.О.Шабурова, Г.К.Птаха, В.Ф.Козаченко, М.М.Лашкевича, В.В. Агафонова, В.Н.Острирова, А.М. Русакова, Д.Е.Корпусова, Д.И.Алямкина, А.В. Дроздова, Г.И.Однокопылова, Д.В. Крайнова, И.Ф.Нугаева, А.П.Темирёва, С.В.Александровского, Д.М.Глухова, Ю.Н.Митрофаненкова и других, зарубежных ученых: Nguyen Kuang Kkhoa, Miller T. J., Krishnan R., Sangshin Kwan, Hamid A. Toliyat, Ruba M., Anders M., Thomas M. Jahns, Irimia N.D., Simon A., Rolf Isermann, Gerling D., Schramm A. Jen-Ren Fu, Thomas A., Lipo Brian, A. Welchko, Yihua Hu, Chun Gan, Wenping Cao, Stephen Finney, M. R. Feyzi, Y. Ebrahimi и других [1-143].

Проведенный обзор научно-технической литературы и патентных исследований позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день вопросы разработки отказоустойчивого управления, в особенности, с выбором совокупности параметров управления и алгоритмической реализации законов управления практически не проработаны. Особую актуальность и значимость приобретает разработка и реализация упрощенных алгоритмов отказоустойчивого управления, с возможностью их реализации на микроконтроллерах без конструктивного вмешательства в структуру ВИП.

Полученные при подготовке диссертационной работы результаты отражены в ряде научных статей и патентов.

1.2. Обзор схемотехнических решений в зарубежной литературе.

Ниже перечислим несколько решений по повышению отказоустойчивости вентильно-индукторного электропривода предложенных зарубежными учеными.

В первую очередь рассматривается секционирование статорной обмотки и увеличение числа фаз электродвигателя. За счет большего количества фаз или

присутствия дополнительной секции значительно повышается отказоустойчивость механизма, и он может быть подвержен большему количеству отказов до полного выхода из строя. В статьях [92-94] рассмотрены несколько способов по повышению отказоустойчивости, такие как: использование пятифазного одноканального электродвигателя, шестифазного двухканального электропривода, четырехфазного двухсекционного двухканального электропривода. Тем самым описаны способы обеспечения резерва живучести вентильно-индукторного двигателя, описаны преимущества и недостатки вышеуказанных способов.

Далее рассмотрено конструктивное изменение структуры строения полюсов статора индукторной машины. Предложен способ по более компактной укладке обмоток и уменьшению расстояния между полюсами статора. Предложено увеличить число полюсов на каждую фазу. Проведено имитационное моделирование и доказана целесообразность подобных конструкторских решений. Предложено схемотехническое решение по увеличению частоты коммутации ключей преобразователя [95-96]. Рассмотрена возможность использовать в качестве регулятора, регулятор на базе нечеткой логики (фаззи регулятор), который позволяет обеспечить более плавное регулирование, уменьшить пульсацию момента, а также быстро выявить момент отказа и подстроить систему под него [97]

В ряде работ [98-103] предложено несколько способов по повышению отказоустойчивости электроприводов с ВИД: за счет использования многофазного электродвигателя как одноканального, так и двухканального электропривода, а так же четырехфазного двухсекционного двухканального электропривода. Рассмотрены возможности использования различных регуляторов и дополнительного оборудования для повышения отказоустойчивости. В ряде работ рассмотрено применение ВИД как исполнительно в различных механизмах [104-114]

.

Выводы по главе 1

1. На основании проведенного обзора следует выделить, что основные существующие исследования были направлены на разработку конструктивных и схемных решений, преимущественно направленных на повышение энергоэффективности, снижение пульсаций МДС, уменьшения шума и упрощение структуры электропривода. Повышение отказоустойчивости ведется путем внедрения дополнительных конструктивных изменений в структуру электропривода.

2. Для вентильно-индукторного электропривода известно применения отказоустойчивые двухсекционные трехфазные электропривода с отдельными фидерами электропитания. Известно применение m -фазных, n -секционных двигателей в приводах гибридных транспортных средств. Также известно использование свойства исходной отказоустойчивости односекционного трехфазного электропривода при отказе в одной из фаз. Однако вопросы разработки алгоритмов отказоустойчивого управления как для односекционных так для и многосекционных электроприводов с полным или частичным восстановлением работоспособности недостаточно исследованы и не решены.

3. В абсолютном большинстве работ посвященных производственным механизмам на базе вентильно-индукторного электропривода аварийный режим не рассматривается. Рассмотрены рабочие режимы, а в случае аварии рассмотрены средства отработки релейной защиты, как такового функционирования в аварийном режиме не исследовано в особенности без конструктивных изменений структуры электродвигателя.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Математическая модель отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода

В целях формирования отказоустойчивого управления исполнительным вентильно-индукторным электродвигателем производственных механизмов существует необходимость разработки алгоритмов отказоустойчивого управления. Для осуществления проверки функционирования целесообразно провести математическое моделирование аварийных процессов в электроприводе. Большинство стандартных программных средств не способно решить эту задачу так как обрыв фазы электродвигателя является недопустимой операцией. Поэтому ставится задача разработки и совершенствования математического описания ВИП допускающего возможность моделирования аварийных процессов вплоть до полного исчерпания рабочего ресурса электродвигателя [1,2,6,19]

Следует отметить, что конструктивно ВИД схож с шаговым двигателем, однако имеет ряд существенных отличий. Существующие методы анализа, синтеза и построения математических моделей, базирующиеся на математическом аппарате структурных схем, практически не представляется возможным применить к ВИД. В виду того что, ВИД обладает значительной нелинейностью магнитной цепи, у этого типа двигателя противо-ЭДС одновременно является функцией тока в обмотках статора и функцией скорости вращения ротора [22,23,26].

Далее в работе рассмотрена модель отказоустойчивого трехфазного ВИП. Для разработанной математической модели были приняты следующие допущения: активные сопротивления фаз двигателя равны и не меняются при переключении режимов работы; двигатель обладает полной электрической и магнитной симметрией; вихревые токи в магнитопроводе не учитываются;

запаздывание, задержки и магнитные потери отсутствуют; мощность источника питания принимается бесконечно большой в сравнении с мощностью двигателя, ключи силового преобразователя приняты идеальными. Из теории электрических машин в основу математического описания любого электродвигателя положены уравнения электрического равновесия фаз двигателя и уравнения формирования электромагнитного момента. На рис. 2.1. приведена схема замещения трехфазного ВИД [19].

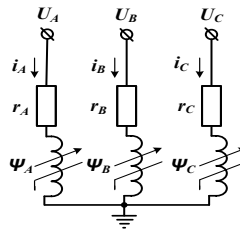


Рис. 2.1. Схема замещения трехфазного ВИД

При принятых допущениях, исходя из законов Кирхгофа, по имеющейся схеме замещения уравнения равновесия трех фаз ВИД будут записаны в следующем виде (2.1):

$$\begin{aligned} U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где: U_A, U_B, U_C – напряжения, приложенные к обмоткам фаз; i_A, i_B, i_C – фазные токи; R_s – электрическое сопротивление фазы. Активные параметры принимаются равными, так как статорные обмотки ВИД симметричны; $\psi_A = \psi(i_A, \theta_A), \psi_B = \psi(i_B, \theta_B), \psi_C = \psi(i_C, \theta_C)$ – формируемые потокоцепления фаз.

Получим линейную математическую модель принимая закономерности электромагнитных процессов при автономной работе фаз без учета насыщения стали. В рассмотренной модели магнитный поток зубца статора определяется магнитодвижущей силой и проводимостью воздушного зазора.

$$\psi_n = w \cdot \Phi_n = i_n \cdot L,$$

где: Φ_n – магнитный поток n-й фазы, L – индуктивность фазы, w – число витков обмотки. Тогда уравнения (2.1) можно записать в виде (2.2):

$$\begin{aligned} U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d(i_A \cdot L_A)}{dt} = R_s \cdot i_A + L \cdot \frac{di_A}{dt} + i_A \cdot \frac{dL_A}{dt}; \\ U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d(i_B \cdot L_B)}{dt} = R_s \cdot i_B + L \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B \cdot \frac{dL_B}{dt} \\ U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d(i_C \cdot L_C)}{dt} = R_s \cdot i_C + L \cdot \frac{di_C}{dt} + i_C \cdot \frac{dL_C}{dt}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

здесь потокосцепление фазы является нелинейной функцией тока фазы ВИД и углового положения ротора относительно статора и определяется конфигурацией двигателя. Первое слагаемое из (2.2) соответствует значению падения напряжения на активном сопротивлении обмотки фазы статора, второе показывает ЭДС самоиндукции, а третье показывает ЭДС вращения.

Преобразуем уравнения (2.2), представив полную производную $\frac{d\Psi_n}{dt}$ потокосцепления фазы ВИД в виде слагаемых с частными производными:

$$\frac{d\Psi_n}{dt} = \frac{d\Psi(i_n, \theta_n)}{dt} = \frac{\partial \Psi(i_n, \theta_n)}{\partial i} \frac{di_n}{dt} + \frac{\partial \Psi(i_n, \theta_n)}{\partial \theta} \frac{d\theta_n}{dt} = L_{dn}(i_n, \alpha_n) \frac{di_n}{dt} + K_{\omega n} \cdot \omega,$$

где: $L_{dn}(i_n, \theta_n) = \frac{\partial \Psi(i_n, \theta_n)}{\partial i}$ – дифференциальная индуктивность n-й фазы;

$K_{\omega n} = \frac{\partial \Psi(i_n, \theta_n)}{\partial \theta}$ – коэффициент противо-ЭДС n-й фазы; $\omega = \frac{d\theta_n}{dt}$ – угловая частота вращения ротора формируемая n-й фазой. θ_n – угол поворота ротора, выраженный в электрических радианах.

Запишем уравнения электрического равновесия трех фаз ВИД (2.1) в матричной форме (2.3):

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Потокасцепления трех фаз ВИД в матричной форме (2.4):

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & L_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & L_C(i_C, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \\
&+ \omega \cdot \begin{bmatrix} K_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & K_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & K_C(i_C, \theta) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Объединив (2.3) и (2.4) запишем уравнения равновесия напряжений в трех фазах ВИД в матричной форме с учетом потокосцеплений:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & L_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & L_C(i_C, \theta) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \\
&+ \omega \cdot \begin{bmatrix} K_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & K_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & K_C(i_C, \theta) \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Представим матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного ВИД в нормальной форме Коши (2.5):

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R][i] - \omega[K_\omega] \}, \tag{2.5}$$

где: $[i]$ – матрица неизвестных (токи статора фаз ВИД); $[U]$ – матрица напряжений фаз ВИД; $[R]$ – матрица сопротивлений фаз ВИД; $[L_d]$ – прямая матрица дифференциальных индуктивностей фаз ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_\omega]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС фаз ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора; ω – частота вращения ротора.

Представим каждый параметр отдельной матрицей:

$$[i] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}; [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix};$$

$$[L_d] = \begin{bmatrix} L_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & L_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & L_C(i_C, \theta) \end{bmatrix};$$

$$[K_\omega] = \begin{bmatrix} K_A(i_A, \theta) & 0 & 0 \\ 0 & K_B(i_B, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & K_C(i_C, \theta) \end{bmatrix}.$$

Для комплексного моделирования аварийных (неполнофазных) режимов работы ВИД необходимо в состав уравнений равновесия напряжений в фазах ВИД (2.5) ввести матрицу $[M_0]$ отказов ВИД, это позволит имитировать отказ типа «обрыв фазы» и «несрабатывание ключа преобразователя частоты» (2.6):

$$[M_0] = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

При этом единичному состоянию битов отказов a , b , c будет соответствовать нормальный номинальный трехфазный режим работы, а нулевому аварийный режим работы при обрыве соответствующей фазы обмотки статора.

Тогда полное выражение для матрицы активных сопротивлений в нормальной форме Коши примет следующий вид (2.7):

$$[R_M] = ([1] + k_\infty [M_0]) \cdot [R], \quad (2.7)$$

где k_∞ — коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора. В этом случае матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного ВИД с учетом матрицы отказов $[R_M]$ в нормальной форме Коши имеет вид (2.8):

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_\omega] \}, \quad (2.8)$$

Преобразование магнитной энергии в механическую без обмена энергией с источником питания происходит при постоянстве потокосцепления и связано

с изменением магнитной проводимости воздушного зазора и функции угла поворота ротора. Исходя из этого, при рассмотрении вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора n -й фазы ВИД записывается как [1, 19, 26]:

$$\Delta W_n = M_n \cdot \Delta \theta,$$

где: M_n – электромеханический момент двигателя формируемый n -й фазой; W_n – механическая энергия, формируемая n -й фазой на интервале $\Delta \theta$ угла поворота ротора.

Принимая момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту исходя из конструктивных особенностей ВИД, изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии ΔW_M , [1, 32, 37]

$$W_{Mn} = \frac{1}{2} L_{dn}(i_n, \theta)$$

В случае ненасыщенной магнитной системы при пренебрежении падением магнитодвижущей силы в стали, электромагнитный момент фаз можно записать как [6]:

$$M_n = \frac{\Delta W_n}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_{Mn}}{\Delta \theta} = \frac{\partial L_{dn}(i_n, \theta)}{\partial \theta} \frac{i_n^2}{2}.$$

Тогда, электромагнитные моменты фаз А, В, С ВИД могут быть определены как (2.9):

$$\begin{aligned} M_A &= \frac{\partial L_{dA}(i_A, \theta)}{\partial \theta} \frac{i_A^2}{2}; \\ M_B &= \frac{\partial L_{dB}(i_B, \theta)}{\partial \theta} \frac{i_B^2}{2}; \\ M_C &= \frac{\partial L_{dC}(i_C, \theta)}{\partial \theta} \frac{i_C^2}{2}; \end{aligned} \quad (2.9)$$

Выражая уравнения для мгновенного электромагнитного момента через производную потокосцепления по углу поворота ротора (2.3), которое в нашем случае, для n -й фазы может быть записано как [32, 37]:

$$M_n = i_n \frac{\partial \Psi_n(i_n, \theta_n)}{\partial \theta}.$$

Учитывая, что: $K_{\omega n} = \frac{\partial \Psi(i_n, \theta_n)}{\partial \theta}$, данное уравнение можно записать (2.10):

$$M_n = i_n \cdot K_{\omega n}, \quad (2.10)$$

коэффициенты противо-ЭДС и электромагнитного момента в системе единиц СИ численно равны, что позволяет представить их как:

$$K_{\omega n}(\text{В} \cdot \text{с/рад}) = K_{Mn}(\text{Н} \cdot \text{м/А}),$$

тогда моменты фаз А, В, С ВИД (2.10) могут быть определены как:

$$M_A = i_A \cdot K_{MA}; M_B = i_B \cdot K_{MB}; M_C = i_C \cdot K_{MC}; \quad (2.11)$$

Мгновенный электромагнитный момент ВИД представляет собой сумму моментов, формируемых подключенными фазами двигателя (2.12). Учитывая принятые допущения, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями запишем суммарный момент M трехфазного ВИД [9]:

$$M = M_A(i_A, \theta) + M_B(i_B, \theta) + M_C(i_C, \theta), \quad (2.12)$$

где: $M_A(i_A, \theta), M_B(i_B, \theta), M_C(i_C, \theta)$ – моменты, развиваемые фазами А, В, С трехфазного ВИД. Уравнение движения электропривода для трехфазного ВИП можно представить в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c), \quad (2.13)$$

где: J – суммарный момент инерции электропривода; p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения ротора; M_c – момент сопротивления двигателя; M , – электромагнитный момент трехфазного ВИД.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в аварийном (неполнофазном) режиме работы трехфазного ВИП (2.14) может быть записана на основе выражений (2.7), (2.8), (2.12), и (2.13):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1}\{[U] - [i][R_M] - \omega[K_\omega]\}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty[M_0])[R]; \\ T_\Pi = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(M - M_c); \\ M = M_A(i_A, \theta_n) + M_B(i_B, \theta_n) + M_C(i_C, \theta_n); \\ \theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ \omega = k_{\text{ВИП}} \frac{\omega_\Delta}{p}, \end{array} \right. \quad (2.14)$$

где: $[i]$, – матрица фазных токов статора трехфазного ВИД; $[U]$, – матрица фазных напряжений трехфазного ВИД; $[M_0]$ – матрица отказов трехфазного ВИД; $[L_d], [L_d]^{-1}$, – прямая и обратная матрица дифференциальных индуктивностей трехфазного ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_\omega]$, – матрица коэффициентов противо-ЭДС трехфазного ВИД в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[R]$, – матрица сопротивлений трехфазного ВИД до отказа и $[R_M]$, – после отказа; $[1]$ – единичная матрица, размером 3 на 3; k_∞ – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора; T_Π – время переключения структуры ЭП, t_1 – момент времени выявленного отказа, t_2 – момент времени восстановления значения частоты вращения (момента) до уровня предшествующего отказу; M , – электромагнитный момент трехфазного ВИД; $M_A(i_A, \theta), M_B(i_B, \theta), M_C(i_C, \theta)$ – моменты фаз А, В, С трехфазного ВИД соответственно в функции фазных токов и текущего положения

ротора (определенные по (2.11) или (2.12)); M_c – момент сопротивления ВИД; J – суммарный момент инерции ЭП; ω – частота вращения ротора; ω_s – частота вращения поля статора ВИП; θ_m, θ – механический и электрический углы ДПР; p – число пар полюсов, $k_{\text{ВИП}}$ – коэффициент режима коммутации ВИП, $k_{\text{ВИП}} = 1$ – симметричная одиночная коммутация, $k_{\text{ВИП}} = 2$ – симметричная парная коммутация, $k_{\text{ВИП}} = 1,5$ – несимметричная коммутация [2, 4, 32]. На рисунке 2.2 Структурная схема математической модели отказоустойчивого ВИП с учетом аварийного и неполнофазного режимов в математической модели.

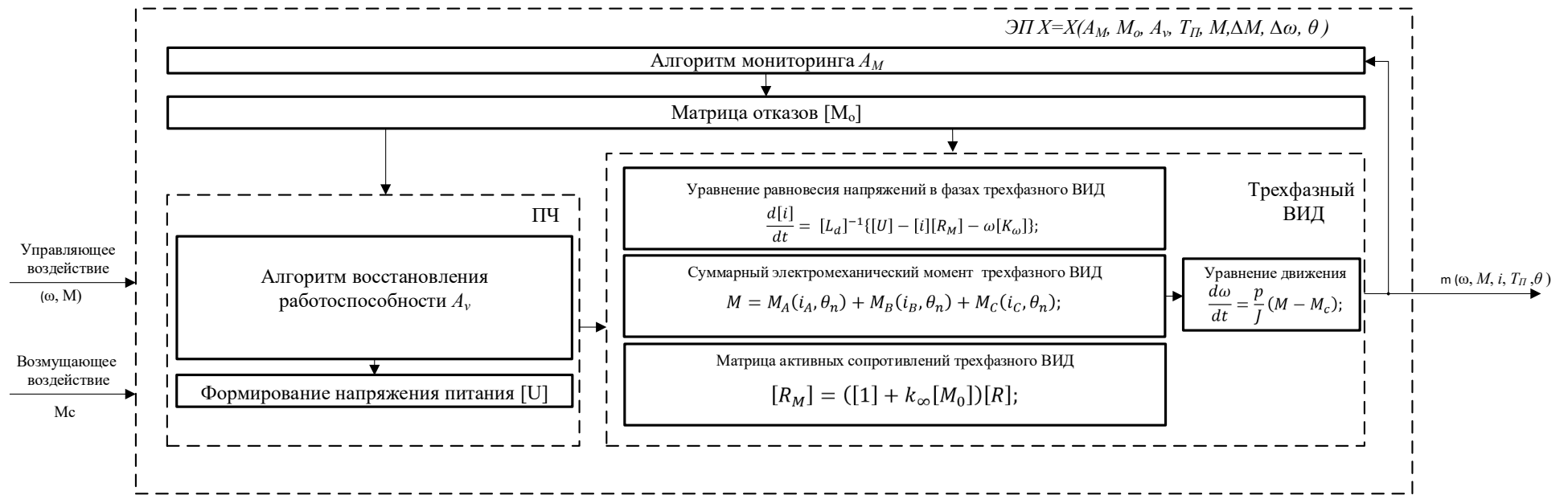


Рисунок 2.2. Математическая модель отказоустойчивого трехфазного
вентильно-индукторного электропривода

2.2. Математическая модель отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода в составе насоса добычи нефти

Управление ВИД насоса добычи нефти в рабочих режимах отличается от управления в аварийных режимах работы, так как обрыв фазы двигателя в классических системах вызывает защитное отключение систем электропривода [4, 46-49]. Соответственно для управления электроприводом насоса добычи и транспортировки нефти в аварийных и неполнофазных режимах работы необходимо разработать алгоритмы мониторинга и управления, отладку которых целесообразно проводить на основе моделирования [1-4, 81, 86-90].

На начальном этапе исследований необходимо было выделить перечень объектов нефтяных скважин, моделирование которых является необходимым для синтеза алгоритмов отказоустойчивого управления [46-49]. Базовая УЭЦН представляет собой комплексную систему, которая состоит из погружного электродвигателя (ПЭД) в качестве которого в работе рассматривается ВИД, системы алгоритмического управления (СУ), центробежного насоса (ЦН), блока обработки телеметрических данных (ТС). В связи с этим модель построена путем объединения моделей ПЭД, ЦН, СУ с моделью учитывающей потери напряжения на кабельной линии (КЛ). При этом модели движение жидкости не рассматривалось, учтено только влияние среды на формирование момента нагрузки ЭД [48].

Состояние ПЭД определяется множеством параметров таких как: ω - частота вращения вала ПЭД, U - Действующее значение трехфазного напряжения питания, M_c —момент сопротивления на валу ПЭД, i - действующие значения токов каждой фазы. Состояние ЦН определяется такими параметрами как: Q - поток жидкости через ЦН, P - давление жидкости на выходе ЦН. Основным параметром КЛ влияющим на напряжение питающей сети является волновое сопротивление Z кабеля. Структура модели УЭЦН с ВИД показана на рисунке 2.3.

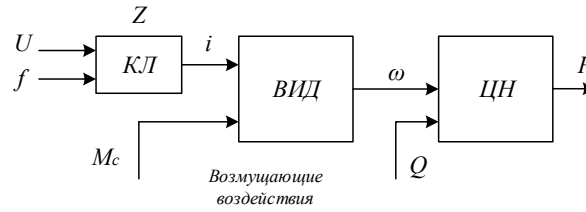


Рис. 2.3. Структура модели УЭЦН

Статическая модель ЦН формируется на основе напорно-расходной характеристики насоса, которая аппроксимируется зависимостью [123]:

$$H_H = H_{f_H} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x + S_f \cdot Q^2 ,$$

где ω_H – номинальная частота вращения вала насоса, H_H – напор на выходе насоса, H_{f_H} – «фиктивный» напор насоса на номинальной частоте, S_f – «фиктивное» сопротивление насоса. где x – степень зависимости нагрузки. Далее выражая напор жидкости через давление:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} ,$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. полученное уравнение статической модели ЦН примет вид:

$$\frac{P}{\rho \cdot g} - H_{f_H} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x + S_f \cdot Q^2 = 0 . \quad (2.15)$$

Постоянная времени, определяющая инерцию изменения давления, уменьшается пропорционально снижению расхода и давления в скважине и не сказывается на системе управления в рассматриваемых условиях. Поэтому переходными процессами в жидкости и инерционностью ЦН в данной модели предлагается пренебречь [48,123]. Для соединения трансформатора питающего напряжения с ПЭД, используется кабельная линия, представленная силовым кабелем длиной до 2000м. Наличие кабеля влияет на динамику процессов, происходящих в проводе, и требует учета при моделировании электропривода.

Погонное продольное активное сопротивление КЛ с распределенными параметрами, включающий две параллельные жилы кабеля для передачи линейного напряжения питания,

$$R_o = s \cdot \frac{1}{\pi \cdot d^2 / 4},$$

индуктивность единицы длины двухпроводной линии:

$$L_o = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{h}{d/2},$$

Емкость единицы длины двухпроводной линии при близком расположении токопроводящих жил:

$$C_o = \frac{\pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{h/2 + a - d/2}{h/2 + a + d/2}}$$

где d – диаметр токопроводящей жилы кабеля, s – электропроводность материала жилы кабеля, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, h – расстояние между осями параллельных проводов, ε – диэлектрическая проницаемость среды, $a = \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$. G_o – диэлектрические потери.

Волновое сопротивление кабеля тогда будет рассчитываться как:

$$Z = \sqrt{\frac{R_o + j\omega L_o}{G_o + j\omega C_o}} \quad (2.16)$$

Модель ПЭД как исполнительного двигателя берем из (2.14). Однако, поскольку механическая характеристика двигателя рассчитаны для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным $\Delta M_{с\text{тр}}$. Момент сопротивления жидкости $\Delta M_{с\text{ж}}$ принимается равным постоянному

значению с учетом характера жидкости, условий эксплуатации, глубины скважины и вязкости [47-49]. Для механизма с вентиляторным типом нагрузки, что характерно для насоса, статический момент сопротивления на валу двигателя изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением (2.17) [119]:

$$M_c(\omega) = M + (M_{c\max} - \Delta M_{c\text{тр}} - \Delta M_{c\text{ж}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (2.17)$$

тогда получаем общую математическую модель УЭЦН на базе вентильно-индукторного электродвигателя из уравнений (2.14 - 2.17):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_\omega] \}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty [M_o]) \cdot [R]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c(\omega)); \\ M = M_A(i_A, \theta_n) + M_B(i_B, \theta_n) + M_C(i_C, \theta_n); \\ M_c(\omega) = M + (M_{c\max} - \Delta M_{c\text{тр}} - \Delta M_{c\text{ж}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2; \\ \frac{P}{\rho \cdot g} - H_{fH} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + S_f \cdot Q^2 = 0; \\ \theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\ Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}; \\ \omega = k_{\text{ВНП}} \cdot \frac{\omega_\omega}{p}. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

2.3. Математическая модель транспортного средства с исполнительным отказоустойчивым вентильно-индукторным электроприводом

Задаваясь вопросом проектирования транспортного средства, в не зависимости от используемого типа исполнительного привода приводящего его в движение, следует выделить основные технико-эксплуатационные показатели. Из ряда материалов известно: «Основными эксплуатационными показателями, влияющими на выбор силовых агрегатов, являются: полный вес транспортного средства G ; геометрические параметры транспортного средства; количество ведущих колес n ; номинальная скорость передвижения $V_{\text{ном}}$; номинальный преодолеваемый подъем $i_{\text{ном}}$; номинальная сила тяги $F_{\text{ном}}$; максимальная скорость передвижения $V_{\text{макс}}$; предельный преодолеваемый подъем $i_{\text{пр}}$; максимальная сила тяги $F_{\text{макс}}$; мощность энергетической установки P » [121].

Любое транспортное средство является мобильным и автономным, следует учитывать, что оно обладает определенными ограничениями по мощности. Так по паспорту транспортного средства максимальная мощность двигателя, аккумуляторной батареи, генератора всегда является определенной величиной. Поэтому при построении предельной тяговой характеристики ТС должно быть учтено постоянство мощности [51-53, 121]. Важным преимуществом вентильно-индукторного двигателя как исполнительного является то, что он обладает тяговой механической характеристикой и характеристикой постоянной мощности [12]. Как известно, реализуемая мощность ТС равна произведению силы тяги на скорость, соответственно тяговая характеристика транспортного средства в идеальном случае соответствует закону равноплечей гиперболы [121].

Следовательно, в первую очередь необходимо определить мощность выбранного ВИД и построить соответственную предельную тяговую характеристику ТС. Для определения мощности ВИД рассмотрим уравнение

тягового баланса [52]. В общем виде тяговый баланс ТС можно представить выражением:

$$F_k = F_\Sigma = F_f + F_\alpha + F_w + F_J \quad (2.19)$$

где F_f – сила сопротивления качению, F_α – сила сопротивления уклона, F_w – сила сопротивления воздушной среды, F_J – сила инерции.

$$F_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (2.20)$$

где m – масса ТС, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, f – коэффициент сопротивления качению, α – угол уклона дорожного полотна.

$$F_f = \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.21)$$

$$F_w = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (2.22)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, S – площадь миделя.

$$F_J = m \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (2.23)$$

где dv/dt – ускорение ТС.

Если принять, что

$$\psi = f(\cos \alpha + \sin \alpha), \quad (2.24)$$

$$K_w = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S}{m \cdot g}, \quad (2.25)$$

$$K_J = \frac{1}{g}, \quad (2.26)$$

$$G = m \cdot g, \quad (2.27)$$

то уравнение тягового баланса примет вид

$$F_K = F_\Sigma = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_J \frac{dv}{dt}). \quad (2.28)$$

В таком случае уравнение мощностного баланса можно представить, как

$$P_K = F_K \cdot v = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_J \frac{dv}{dt}) \cdot v, \quad (2.29)$$

где P_K – суммарная тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам.

На основе выражения (2.29) можно построить предельную тяговую характеристику. Определим ключевые точки для построения характеристики, они задаются тремя участками (рисунок 2.4): «Первый участок, характеризующий максимальное тяговое усилие показан отрезком АВ. Граничная скорость максимального тягового усилия определяет точка В. Участок характеристики BD определяется выбранной мощностью автономной энергетической установки. Максимальное тяговое усилие при номинальном угле подъема и номинальной скорости определяется в точке С. Наибольшее тяговое усилие при максимальной скорости в точке D. Точка С предопределяет энергетическую эффективность системы. В этой точке система электропривода должна показывать максимальное значение КПД. Следовательно, номинальная скорость должна соответствовать скорости преобладающей при заданных эксплуатационных условиях» [121].

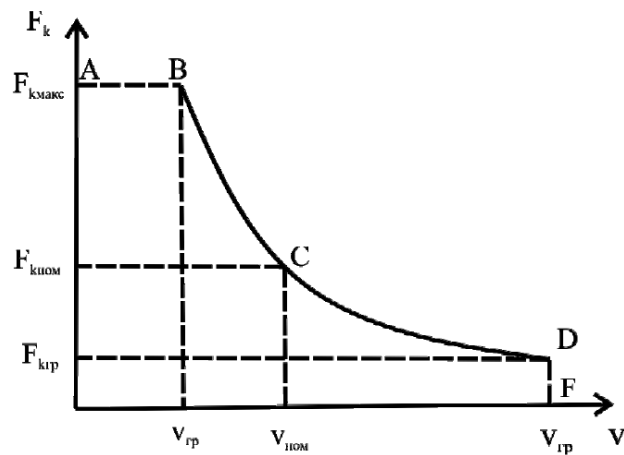


Рисунок 2.4. Предельные тяговые характеристики транспортного средства

Зададимся параметрами типового автомобиля класса С и сведем их в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Параметры электромобиля

Максимальная скорость автомобиля, м/с	50 (180 км/ч)
Снаряженная масса автомобиля, кг	1100
Полная масса автомобиля	1600
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,3
Коэффициент сопротивления качению	0,01
Площадь миделя, м ²	2
Номинальный угол подъема	10
Мощность, кВт	60
Удельная мощность, кВт/т	54,5

За основу был принят расчет [52]. Согласно [118,126] максимальную мощность определяем как:

$$P_{\text{макс}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{\text{макс}}^2) \cdot V_{\text{макс}}}{\eta_{\Sigma}}, \quad (2.30)$$

где f и K_w –коэффициенты сопротивления движению, η_{Σ} – суммарный КПД системы, примем $\eta_{\Sigma} = 0,84$.

И соответственно тяговую характеристику ТС $F(v)$ определяют, как:

$$F(v) = \frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{v}. \quad (2.31)$$

Определим из выражения (24) максимальную скорость электромобиля при снаряженной массе:

$$V_{\text{макс}0} = 50 \text{ [м/с]}.$$

При полной массе:

$$V_{\text{макс}} = 43,7 \text{ [м/с]}.$$

Определим ключевые точки тяговой характеристики для рассматриваемого электромобиля. Используя уравнения (2.19)–(2.31) так же рассчитаем номинальную скорость электромобиля. Для начала определим параметры для движения без какого-либо подъема дорожного покрытия по

прямой дороге. Тогда решив уравнение (2.32) найдем номинальную скорость движения.

$$\frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{\text{ном}}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{\text{ном}}^2) \cdot V_{\text{ном}}}{\eta_{\Sigma}} \quad (2.32)$$

Расчетная номинальная скорость для снаряженной массы:

$$V_{\text{ном}} = 15 \text{ [м/с]}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{\text{ном}} = 13 \text{ [м/с]}.$$

Далее, рассчитаем номинальную скорость для номинального угла подъема. Тогда среднюю расчетную скорость для номинального угла подъема найдем из равенства (27).

$$\frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{\text{ном}}} = \frac{G \cdot (f(\cos \alpha + \sin \alpha) + K_w \cdot V_{\text{ном}}^2) \cdot V_{\text{ном}}}{\eta_{\Sigma}} \quad (2.33)$$

Расчетная номинальная скорость для снаряженной массы:

$$V_{\text{ном}} = 14,5 \text{ [м/с]}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{\text{ном}} = 12,6 \text{ [м/с]}.$$

Далее будем рассматривать только полную массу, так как это больше соответствует реальным условиям эксплуатации ТС. Рассчитаем вторую координату для точки С (рисунок 1.6), предельное тяговое усилие, для номинальной скорости в соответствии с (2.19):

$$F_{\text{кном}} = 5902 \text{ [Н]}.$$

Так как максимальная скорость задана (таблица 2.1), то предельное тяговое усилие при максимальной скорости на прямой дороге:

$$F_{\text{кзр}} = 1466 \text{ [Н]}.$$

Точка А определяется максимальным усилием, усилие определяется сцеплением движителя (мотор-колеса) с грунтом. Определим максимальное усилие по формуле (2.34)

$$F_{\text{кmax}} = f \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot 1600 \cdot 9,81 = 12556 \text{ [Н]}. \quad (2.34)$$

где f – коэффициент сцепления движителя с дорогой. Примем $f = 0,8$ для случая сцепления колеса с сухим асфальтом.

Зная максимальную мощность электромобиля, определим координату скорости точки В по (2.31).

$$V_{zp} = \frac{P_{\max} \cdot \eta_{\Sigma}}{F_{k \max}} = \frac{60000 \cdot 0,84}{12556} = 4 \text{ [м/с]}.$$

Таким образом, получена предельная тяговая характеристика электромобиля для заданных параметров, показанная на рисунке 2.5

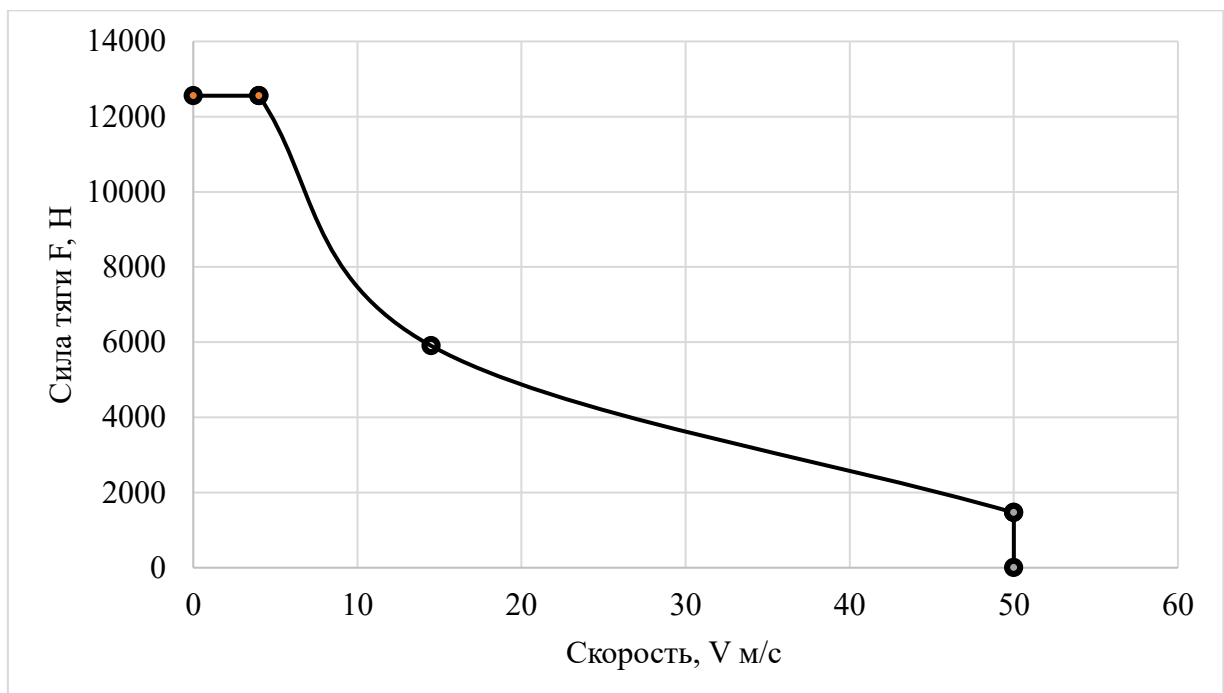


Рисунок 2.5. Расчитанная предельная тяговая характеристика электромобиля

Были рассчитаны характерные точки предельной тяговой характеристики, по которым она была построена. Был осуществлен расчет для типового городского автомобиля С класса [53].

Итоговая разработанная математическая модель транспортного средства с ВИД (2.35) в виде системы уравнений, дополняющих основную систему уравнений (2.14) приведена ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_\omega] \}; \\
[R_M] = ([1] + k_\infty [M_o]) \cdot [R]; \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c(\omega)); \\
M = M_A(i_A, \theta_n) + M_B(i_B, \theta_n) + M_C(i_C, \theta_n); \\
M_c(\omega) = M + (M_{c_{max}} - \Delta M_{c_{тр}}) \cdot J_\vartheta \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2; \\
\theta_n = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\
S = \int_0^t \vartheta dt; \\
F_K = G \cdot (\gamma + K_\omega \cdot \vartheta^2 + K_J \cdot \frac{d\vartheta}{dt}); \\
\omega = k_{\text{вип}} \cdot \frac{\omega_\vartheta}{p}.
\end{array} \right. \quad (2.35)$$

Где F_K – суммарная сила тяги ТС; $d\vartheta/dt$ – ускорение ТС; $K_\omega = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot L}{m \cdot g}$ и $K_J = \frac{1}{g}$ – дополнительные вводимые коэффициенты; $G = m \cdot g$ – полный вес автомобиля; m – масса ТС, g – ускорение свободного падения; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho = 1,2 \text{ км/м}^3$ – плотность воздуха; L – площадь миделя; ϑ – скорость ТС; $\gamma = f(\cos\alpha + \sin\alpha)$, где α – угол уклона дорожного полотна, f – коэффициент сопротивления качению; S – перемещение ТС.

2.4. Математическая модель многосекционного отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода

Многосекционный двигатель выполняется на основе независимых n – фазных статорных обмоток, расположенных на одном валу электродвигателя. Рассмотрим пример формирования модели для двухсекционного электродвигателя. Структурная схема двухсекционного электропривода ($m=2$) приведена на рисунке 2.6.

В этом случае необходимая избыточность формируется при комплексном использовании структурного резерва многосекционного (число секций m) n -фазного двигателя (с числом фаз $n=3$) и функционального резерва, основанного на использовании возможности работы трехфазной секции на двух фазах оставшихся работоспособных фазах [17, 22, 23].

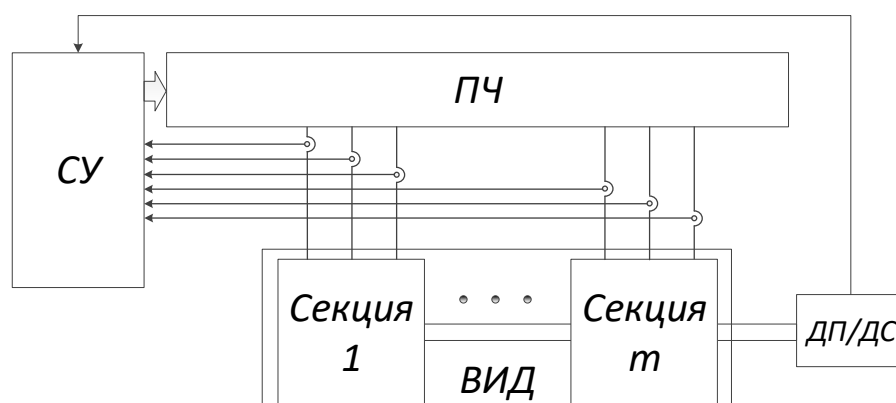


Рисунок 2.6. Структурная схема двухсекционного ВИП

Электропривод состоит из системы управления (СУ), преобразователя частоты (ПЧ), двухсекционного ВИД, датчика положения/скорости (ДП/ДС), датчиков тока по одному на каждую фазу. Работа ЭП осуществляется за счет сигналов, поступающих с ДП в СУ, в которой СУ на основе сигналов с соответствующих датчиков тока каждой фазы формирует текущее задание на ток для ПЧ. Преобразователь осуществляет коммутацию транзисторов ПЧ, обеспечивая поочередное питание фаз каждой секции электродвигателя [17, 22].

При моделировании многосекционного ВИД были приняты те же допущения что и при моделировании трехфазного односекционного ВИД. Все секции электродвигателя расположены на одном валу либо имеют жесткое соединение валов.

Электромагнитный момент двигателя представляет собой сумму моментов формируемых независимыми фазами, поэтому суммарный момент первой секции трехфазного ВИП:

$$M1 = M_{1A}(i_{1A}, \theta) + M_{1B}(i_{1B}, \theta) + M_{1C}(i_{1C}, \theta), \quad (2.36)$$

где: $M_{1A}(i_{1A}, \theta)$, $M_{1B}(i_{1B}, \theta)$, $M_{1C}(i_{1C}, \theta)$ – моменты, развиваемые фазами А, В, С первой секции трехфазного ВИД.

Для второй секции:

$$M2 = M_{2A}(i_{2A}, \theta) + M_{2B}(i_{2B}, \theta) + M_{2C}(i_{2C}, \theta), \quad (2.37)$$

где: $M_{2A}(i_{2A}, \theta)$, $M_{2B}(i_{2B}, \theta)$, $M_{2C}(i_{2C}, \theta)$ – моменты, развиваемые фазами А, В, С второй секции трехфазного ВИД.

Тогда уравнение движения электропривода для трехфазного ВИП можно представить в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_1 + M_2 - M_c), \quad (2.38)$$

где p – число полюсов ротора ВИП; M_1 , M_2 – формируемый электромагнитный момент первой и второй секций ВИП.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в неполнофазном режиме работы двухсекционного трехфазного ВИП (2.39) может быть записана на основе выражений с учетом наличия дополнительной секции (2.14), (2.36), (2.37) и (2.38):

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1} \{ [U_1] - [i_1][R_{M1}] - \omega[K_{\omega 1}] \}; \\
\frac{d[i_2]}{dt} = [L_{d2}]^{-1} \{ [U_2] - [i_2][R_{M2}] - \omega[K_{\omega 2}] \}; \\
[R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{O1}])[R_1]; \\
[R_{M2}] = ([1] + k_{\infty}[M_{O2}])[R_2]; \\
T_{II} = t_2 - t_1; \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_1 + M_2 - M_c); \\
M_1 = M_{A_1}(i_{A_1}, \theta) + M_{B_1}(i_{B_1}, \theta) + M_{C_1}(i_{C_1}, \theta); \\
M_2 = M_{A_2}(i_{A_2}, \theta) + M_{B_2}(i_{B_2}, \theta) + M_{C_2}(i_{C_2}, \theta); \\
\alpha\theta_m = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\
\omega = k_{\text{вип}} \frac{\omega_{\text{э}}}{p},
\end{array} \right. \quad (2.39)$$

На базе вышеуказанной модели, возможно построить модель отказоустойчивого ВИП с любым количеством секций (m).

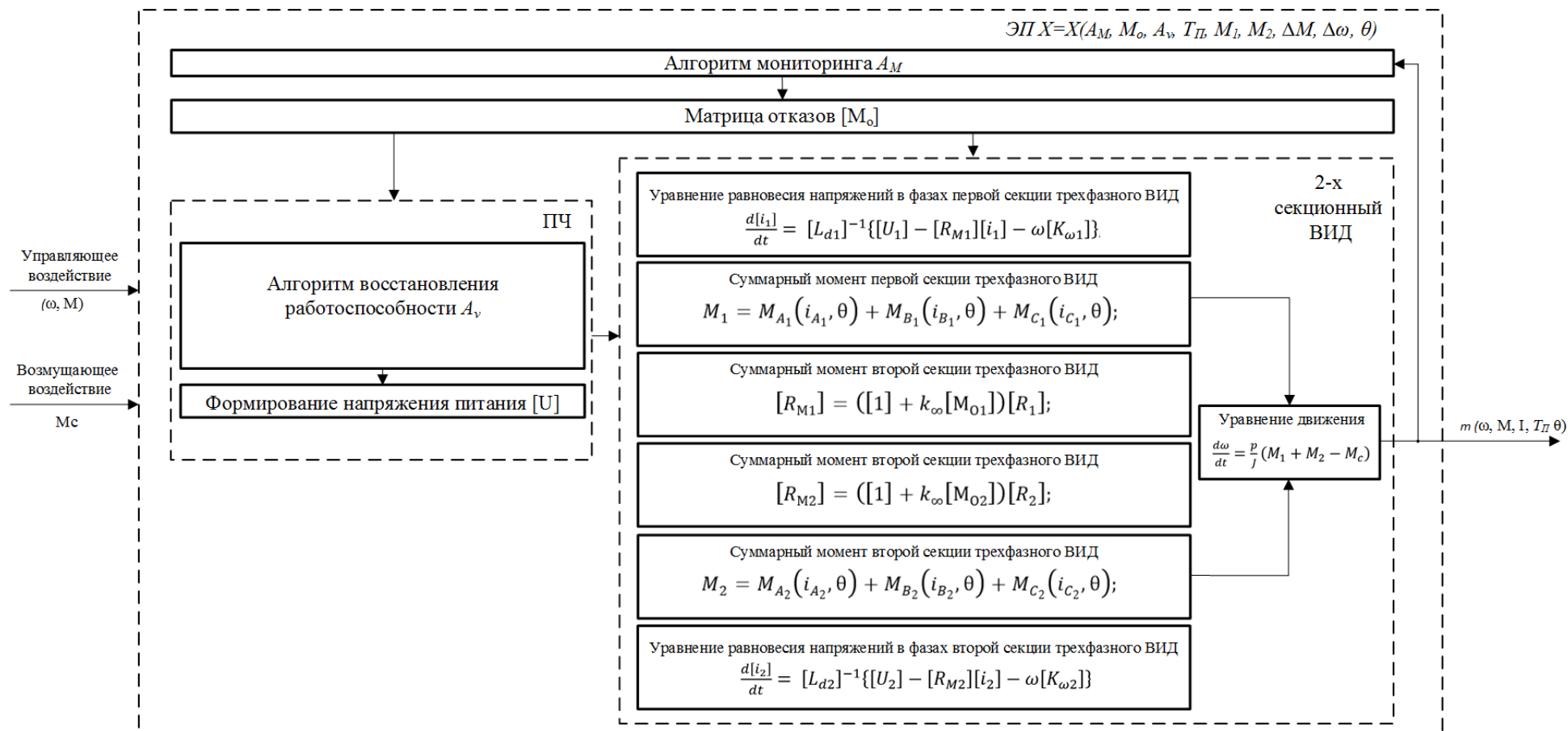


Рисунок 2.7. Математическая модель двухсекционного отказоустойчивого трехфазного вентильно-индукторного электропривода

2.5. Имитационное моделирование отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода.

2.5.1. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода.

Имитационные модели отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода разработаны для одно- и двухсекционного трехфазного двигателя. Структура математической модели отказоустойчивого трехфазного вентильно-индукторного электропривода с учетом аварийных и неполнофазных режимов работы изображена на рис. 2.2.

Модель позволяет формировать аварийные режимы ЭПТ, представленные функционалом $X=X(A_M, [M_O], A_v, s_r, T_{II}, M_1, M_2, \Delta M, \Delta \omega, \theta)$ для заданных управляющих воздействий ω_3, M_3 , возмущающего воздействия M_c , выходных координат ЭП $m = m(\omega, M, I, T_{II}, \theta, s_r)$ с учетом суммарного электромагнитного момента, формируемого двумя независимыми секциями двигателя, непрерывного мониторинга состояния модели A_M . Формированием на основе мониторинга матрицы $[M_O]$ отказов и реализацией алгоритмов A_v восстановления работоспособности одно или двухсекционного трехфазного ЭП в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Для проверки работоспособности разработанной математической модели, а также для проверки разработанных алгоритмов диагностики и управления, создадим имитационную модель в среде моделирования MatLab Simulink, для этого воспользуемся [19-23, 86-90].

За исходную первоначальную модель была принята модель односекционного 3-х фазного вентильно-индукторного электропривода с 6 полюсами на статоре и 4-мя на роторе SRM (6/4). Данную модель можно скомпилировать командой `Power_SwitchedReluctanceMotor` в окне рабочего пространства MatLab Simulink любой версии после 2008b. Эта модель находится в свободном доступе и позволяет моделировать вентильно-индукторный электропривод в нормальных рабочих режимах. Оставим

имеющиеся параметры и настройки без изменений, добавим несколько блоков и алгоритмов которые дадут возможность исследовать вентильно-индукторный электропривод в аварийных режимах работы. А также видоизменим систему управления уйдя от релейного к широтно-импульсному регулированию. Собранная модель практически полностью соответствует прототипу [98]. Для проверки адекватности было проведено ряд экспериментов подтверждающих полную идентичность полученных результатов моделирования в нормальных рабочих режимах. Было проведено сравнение полученных характеристик, на основании которого можно судить об адекватности полученной разработанной модели [98].

Сравним характеристики, полученные в [98] с полученными на собранной модели:

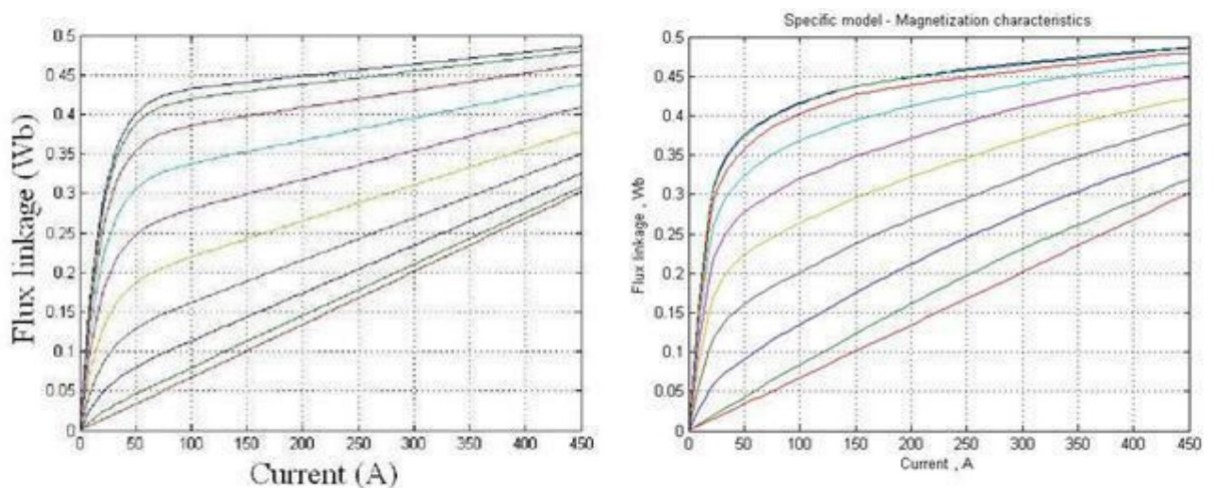


Рисунок 2.8. Характеристики намагничивания прототипа (слева) и собранной модели (справа)

Для классического инвертора напряжения собранного по схеме рисунок 2.13, характеристики имеют вид, показанный на рисунках 2.8.

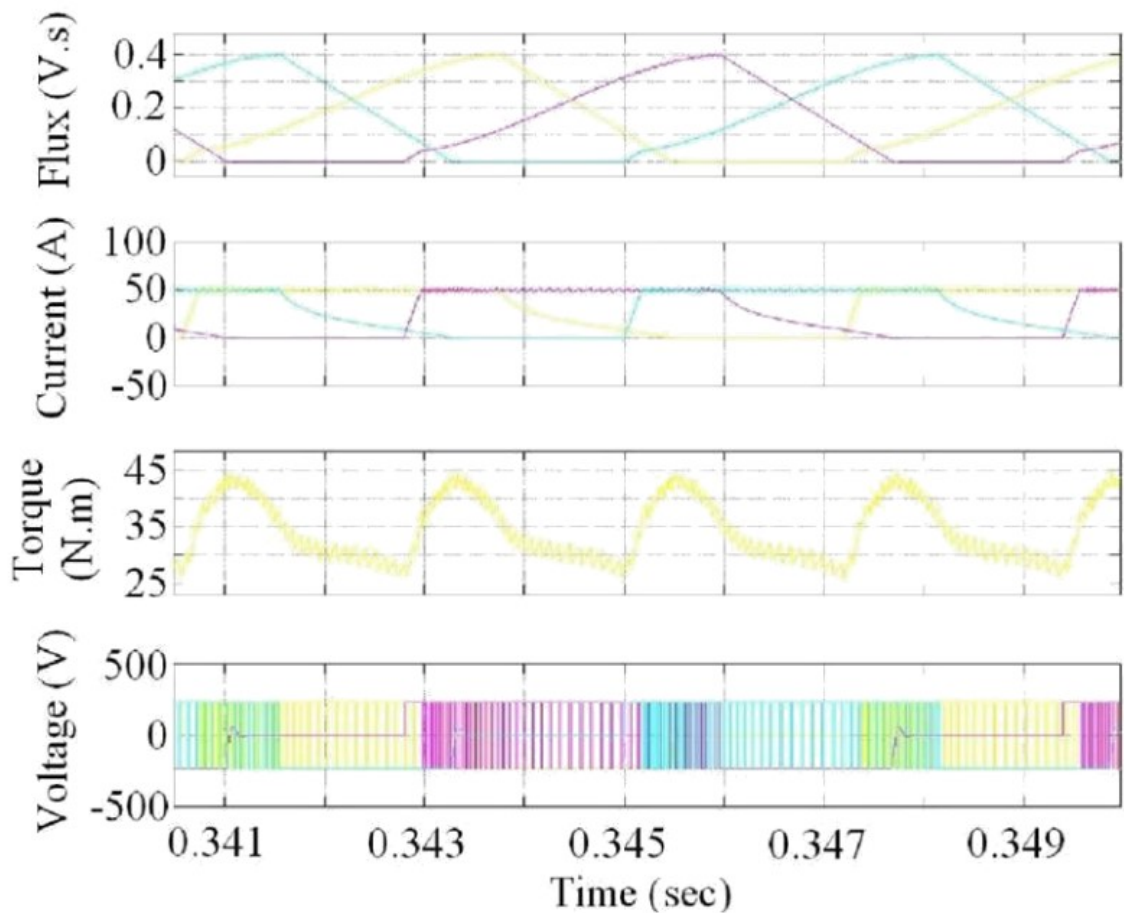


Рисунок 2.9. Характеристики для классического инвертора напряжения модели прототипа сверху вниз: потокосцепление ($\text{В}\cdot\text{с}$), ток статорных обмоток (А), Вращательный момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$), Напряжение питания (В)

Полученные диаграммы рисунок 2.10 полностью идентичны с диаграммами из рисунка 2.9, из чего можно сделать вывод, что модель адекватна и пригодна для дальнейших исследований. При моделировании воспользуемся явным методом Рунге-Кутты высшего порядка, а именно методом Дормана-Принса 8-го порядка. В MatLab Simulink это функция `ode45`. Функция `ode45` предназначена для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Она применима как для решения простых дифференциальных уравнений, так и для моделирования сложных динамических систем. Шаг моделирования при таком методе стандартно взят равным $t = 10^{-6}$.

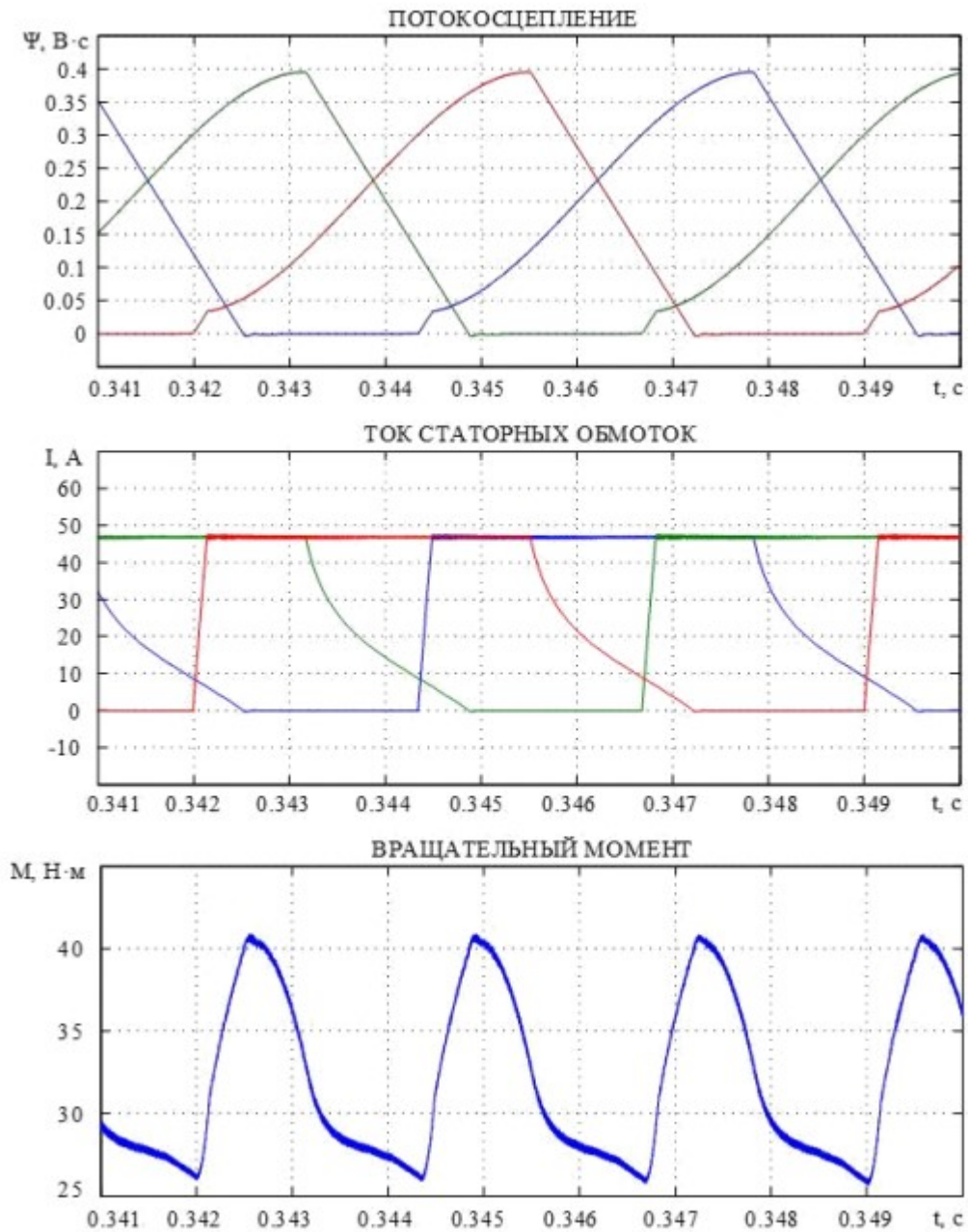


Рисунок 2.10. Характеристики для классического инвертора напряжения для собранной модели, сверху вниз: потокосцепление (В*с), ток статорных обмоток (А), Вращательный момент (Н*м).

Рассчитаем постоянные времени электропривода по имеющимся данным:

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{эм} = \frac{L}{R_L} = \frac{0.00067}{0.05} = \frac{[Гн]}{[Ом]} = 0.0134 [с] \quad (2.40)$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{\text{мех}} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s_H = \frac{0.05 \cdot 710}{22} \cdot 0.02 = \frac{[\text{кг} \cdot \text{м}^2] \cdot [\text{рад}]}{[\text{с}] \cdot [\text{Н} \cdot \text{м}]} = 0.0323 [\text{с}] \quad (2.41)$$

Внешний вид имитационной модели односекционного отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода приведен на рисунке 2.11. Основные параметры модели односекционного вентильно-индукторного электропривода приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Параметры исследуемого ВИД.

Параметр	Величина
Сопротивление обмотки статора, R_L [Ом]	0,05
Момент инерции, J [кг·м ²]	0,05
Момент трения, M_T [Н·м·с]	0,02
Начальная скорость, ω_0 [рад/с]	0
Начальное положение ротора α_0 , [рад]	0
Индуктивность в рассогласованном положении, L_1 [Гн]	$0,67 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность в согласованном положении, L_2 [Гн]	$23,6 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность насыщения согласованного положения, L_3 [Гн]	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Максимальный ток, I [А]	450
Максимальное потокосцепление, Ψ [В·с]	0,486
Напряжение питания, U [В]	230
Электромагнитная постоянная времени, T_θ [с]	0,0323
Электромеханическая постоянная времени, $T_{\text{мех}}$ [с]	0,0323

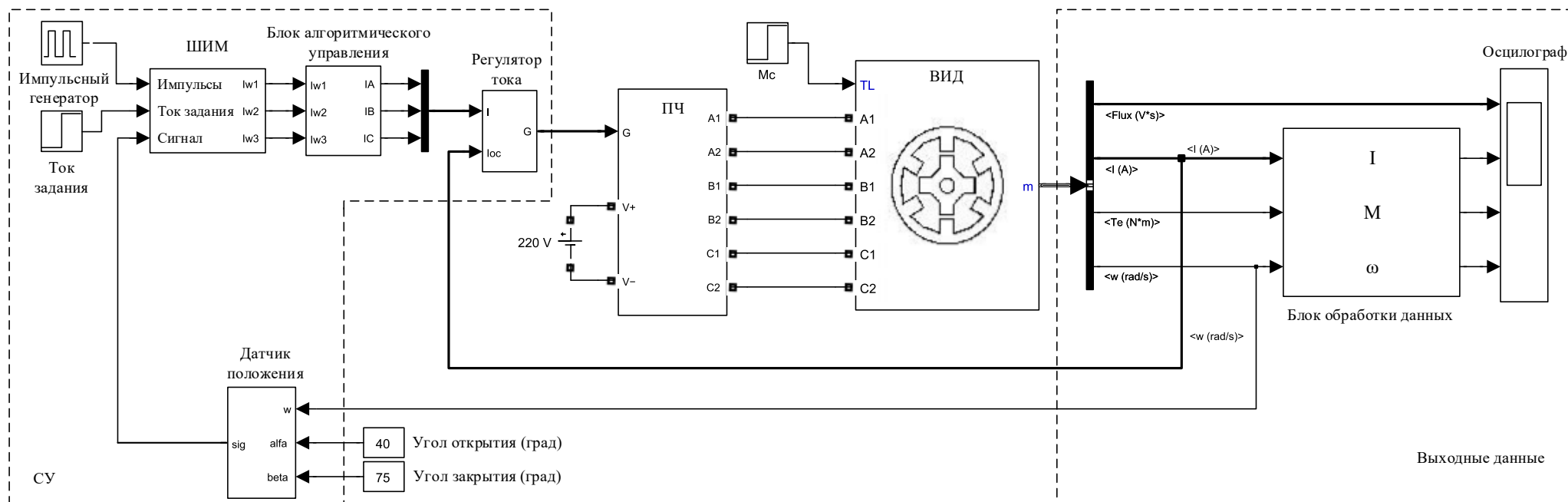


Рисунок 2.11. Внешний вид имитационной модели односекционного отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода

Подробнее остановимся на каждом из блоков.

Блок формирования широтно-импульсной модуляции для формирования фазных токов приведен на рисунке 2.12.

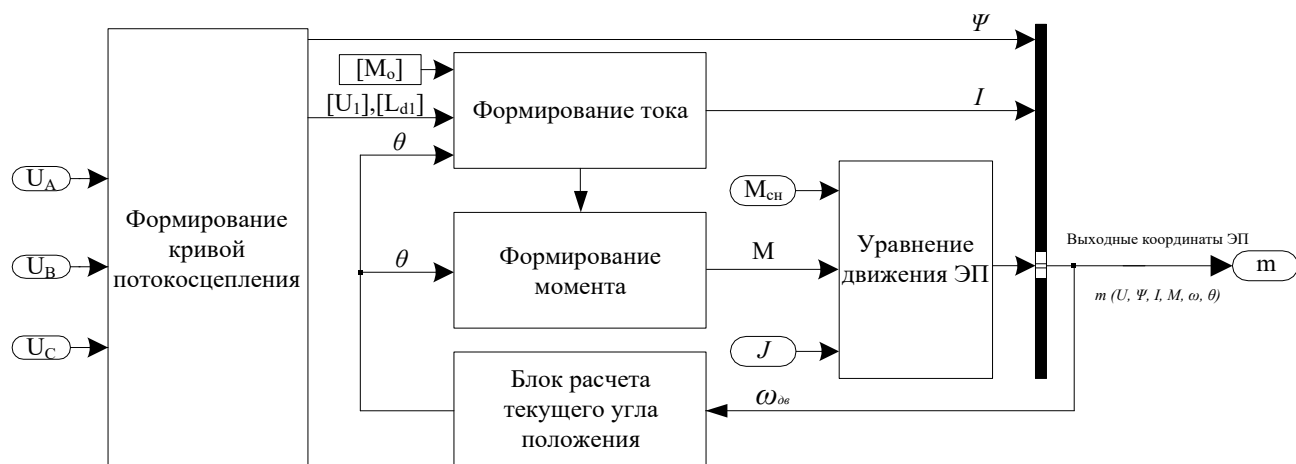


Рисунок 2.12. Блок формирования ШИМ

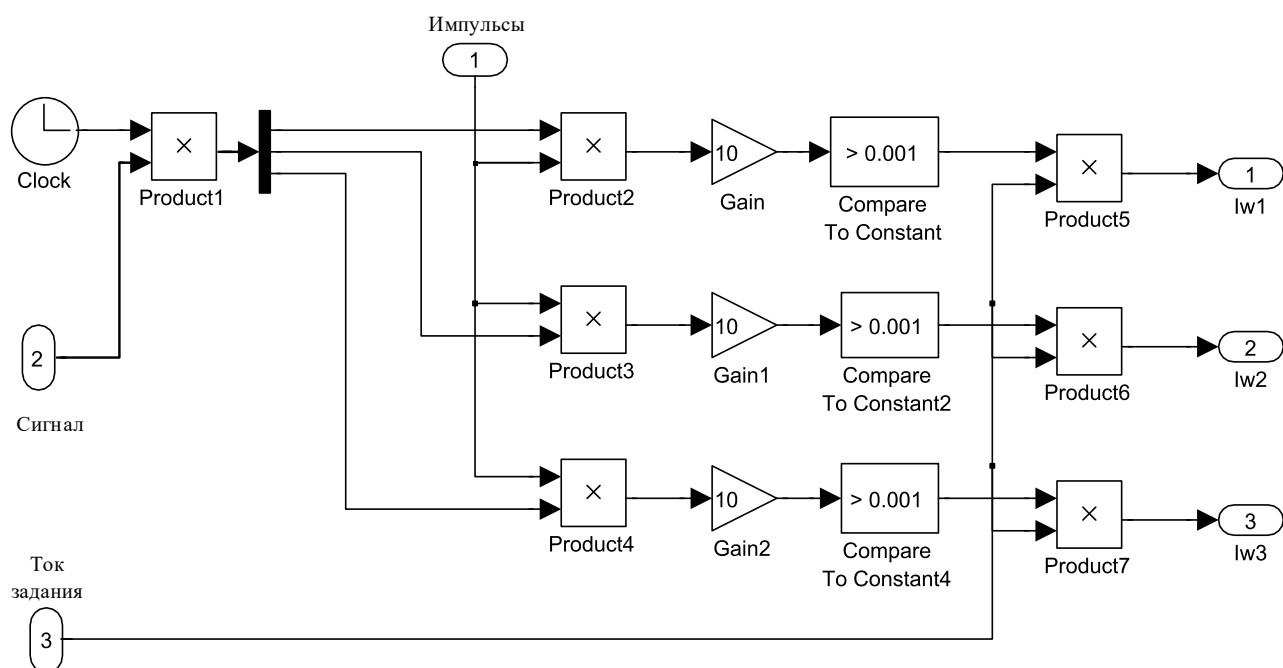


Рисунок 2.13. Строение блока ШИМ

Работа блока ШИМ основывается на формировании в реальном времени фазных токов для всех трех фаз электродвигателя. Трехфазный логический сигнал, приходящий с датчика положения ротора (где каждая фаза уже сдвинута одна относительно другой на заданный угол коммутации) разделяется

по фазам, каждый из сигналов умножается на импульсы, приходящие с импульсного генератора. Далее во избежание погрешностей и случайных срабатываний происходит логическое сравнение сигналов с заданной точностью, чтобы они были больше 0.001. Затем полученные сигналы умножаются на значение тока задания. Тем самым на выходе мы имеем ШИМ сигнал с амплитудой тока задания для каждой из фаз на основании сигнала приходящего с датчика положения ротора. Далее с блока ШИМ сформированные сигналы с амплитудой токов задания фаз I_{w1} , I_{w2} , I_{w2} поступают в блок алгоритмического управления. Блок алгоритмического управления может иметь различный вид в зависимости от заданного алгоритма отказоустойчивого управления. Ниже на рисунке 2.13 приведено внутреннее строение блока алгоритмического управления при применении алгоритма управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз.

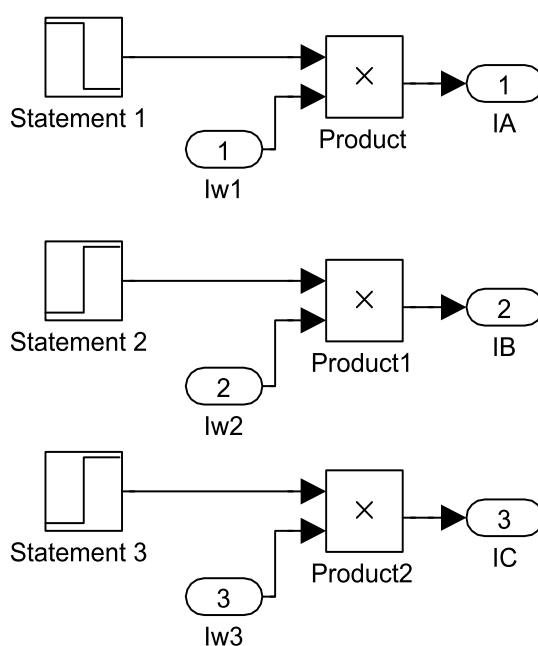


Рисунок 2.14. Внутреннее строение блока алгоритмического управления при применении алгоритма управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз

Работа данного блока основывается на простейшем алгоритме компенсации амплитуд фазных токов оставшихся в работе фаз в случае отказа

одной и трех фаз электродвигателя. Рассмотренный блок показывает принудительную компенсацию в заданный момент времени. А именно умножение сигналов с амплитудой токов задания фаз I_{w1} , I_{w2} , I_{w2} на коэффициент k_d реализованный тут блоками Step (Statement 1,2,3). Умножение происходит в момент времени, когда система зафиксировала отказ фазы, тем самым формируя для дальнейшей работы токи больших амплитуд для компенсации провала момента и частоты вращения. Если отказ не происходит, задания на ток формируются без изменений. Показана простейшая реализация блока, для снятия характеристик, на деле возможна реализация блока в качестве алгоритма на языке C++, позволяющий одновременно производить диагностику и формировать компенсирующий коэффициент с необходимой заданной точностью.

Далее рассмотрим блок регулятора тока. Здесь может быть любой регулятор тока, начиная с релейного и заканчивая фаззи регулятором. Однако для исследования был выбран обыкновенный ПИ-регулятор. Блок ПИ-регулятора реализованный в Matlab Simulink показан на рисунке 2.15.

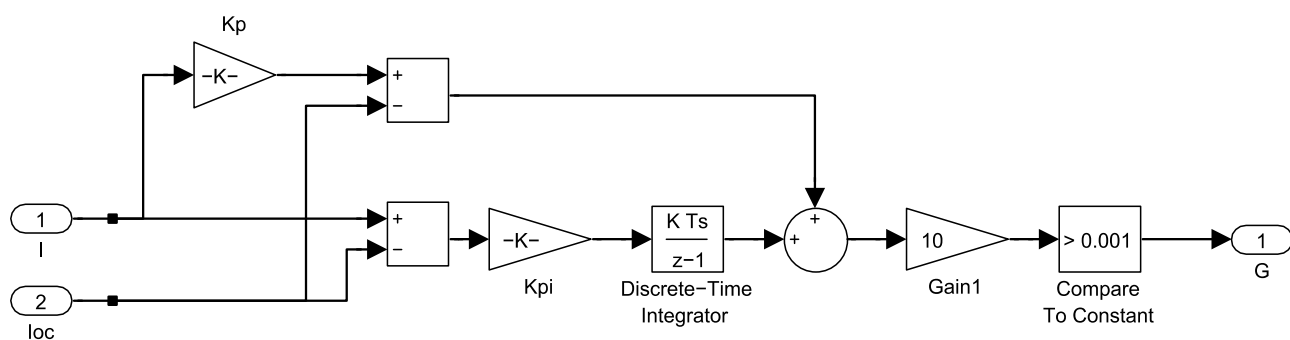


Рисунок 2.15. Блок ПИ-регулятора в Matlab Simulink

Блок входит в библиотеку Matlab. В блоке производится сравнение сигнала задания с сигналом, приходящим с обратной связи по току. Разница этих сигналов проходит через пропорциональную и интегральную составляющую регулятора для фильтрации выходного сигнала. На выходе регулятора формируются единичные сигналы для управления ключами

преобразователя частоты. Строение блока преобразователя частоты показано на рисунке 2.11.

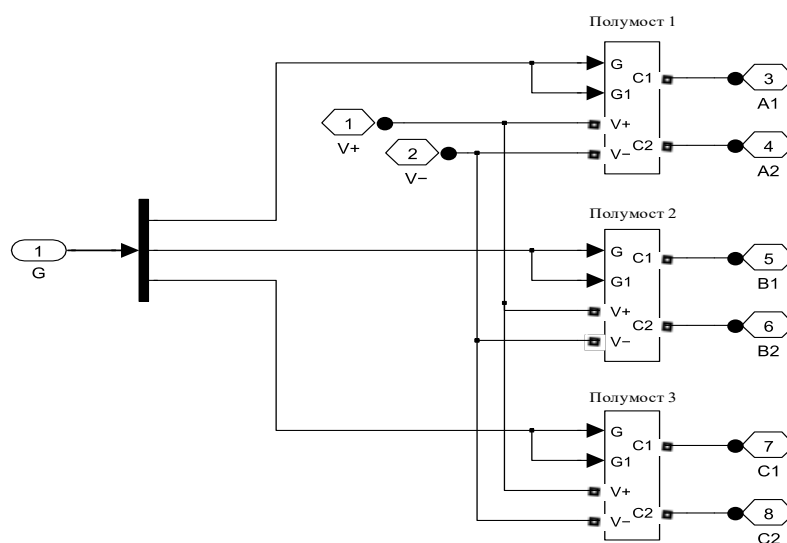


Рисунок 2.16. Строение ПЧ

Для питания ВИД была выбрана наиболее часто используемая схема полумостового инвертора напряжения [74]. Инвертор напряжения (ИН) состоит из m включенных параллельно фазных полумостов (m - количество фаз электрической машины). Каждый полумост содержит два несимметричных плеча, состоящих из управляемого силового ключа – IGBT–транзистора и обратного диода, соединенных последовательно (рисунок 2.17).

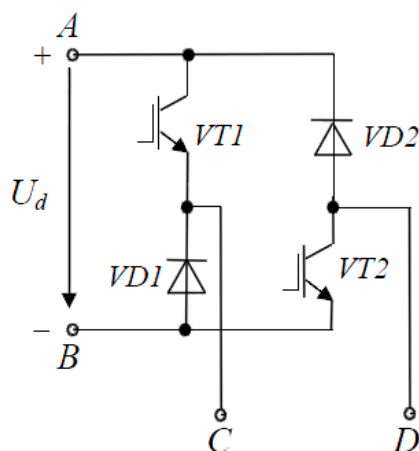


Рисунок 2.17. Электрическая схема фазы полумостового ИН: VT 1, VT2 – IGBT – транзисторы; VD1, VD2 – диоды; U_d – напряжение звена постоянного тока.

Математическая модель ИН «собрана» путём использования элементов встроенных библиотек пакета SimPowerSystems, входящих в состав MatlabSimulink. Математические модели, положенные в основу описания элементов (IGBT, и диодов), и их реализации представлены в руководстве пакета SimPowerSystems (например, на сайте разработчика) или специализированной литературе, посвящённой моделированию средств силовой электроники [89-91]. Каждый полумост преобразователя частоты собран по схеме, приведенной на рисунке 2.18.

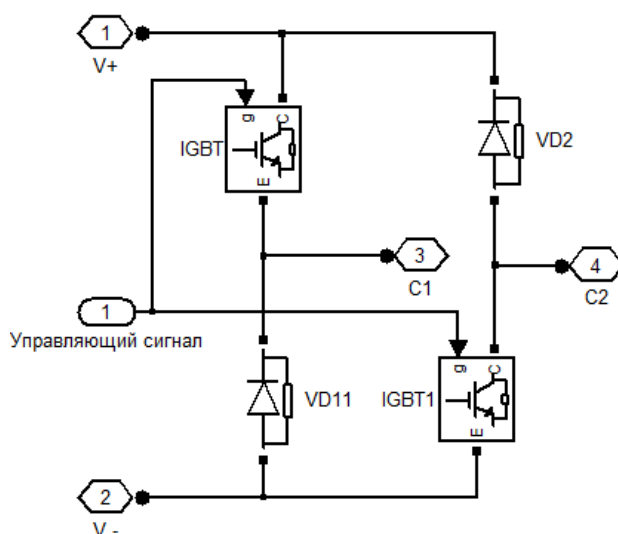


Рисунок 2.18. Simulink–модель фазного полумоста ИН

Плечи полумоста образованы IGBT-транзисторами VT1, VT2 и диодами VD1, VD2. Портами $+U_d$ и $-U_d$ полумост подключается к звену постоянного тока. К портам $+U$ и $-U$ подключается фазная обмотка ВИД. Через порт (1) подаются сигналы (g) на открытие/закрытие верхнего и нижнего транзисторов IGBT, IGBT1.

Перейдем к блоку датчика положения ротора. На рисунке 2.19 Simulink-модель подсистемы «Датчик положения».

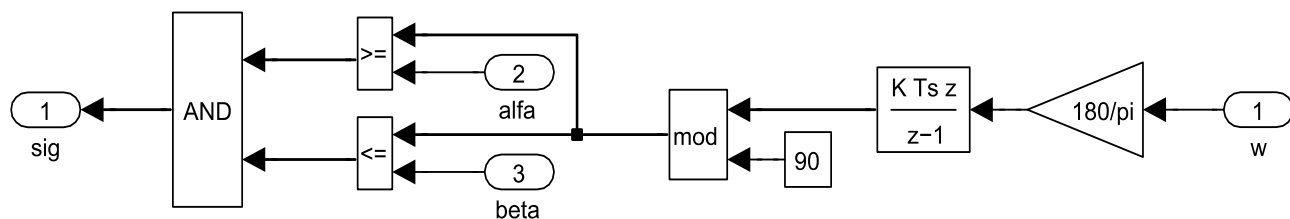


Рисунок 2.19. Simulink-модель датчика положения ротора.

Текущий сигнал скорости преобразуется при помощи интегрирования в угол положения и переводится в градусы. Далее с помощью блока `mod` приводится к диапазону $(0...360)$ град. Далее обработанный сигнал сравнивается с сигналами с портов `alfa` и `beta`. В случае, если угол больше угла включения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; если угол меньше угла выключения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; иначе – ноль. Далее сигналы поступают на блок логического и, единица на выходе которого (порт `sig`) появляется только в случае одновременного поступления единичных сигналов на вход. Этот сигнал является управляющим для включения/выключения транзисторов *ИН* [20].

Ниже приведена имитационная модель вентильно индукторного электродвигателя рисунок 2.20.

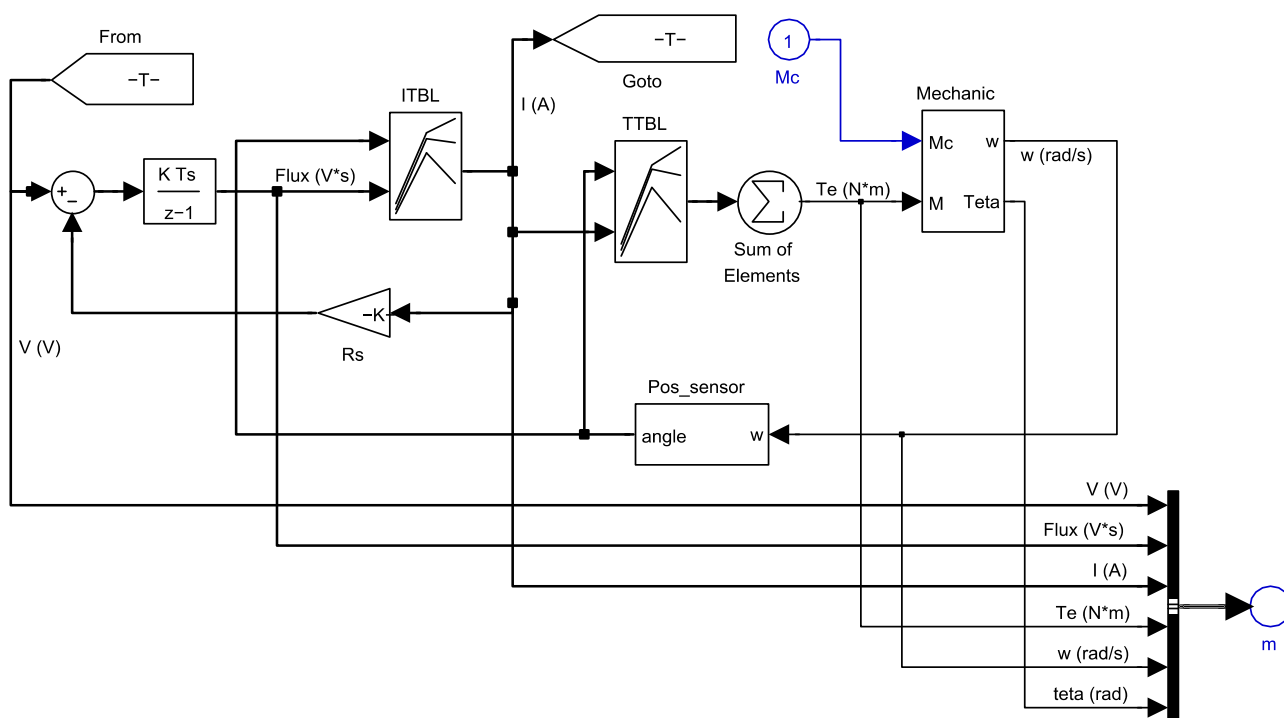


Рисунок 2.20. Имитационная модель вентильно-индукторного электродвигателя из библиотеки SimPowerSystems.

Данная модель является стандартным блоком входящим в библиотеку элементов MatLab Simulink SimPowerSystems/ Machines/ Switcher-Reluctance motor. Подробное описание работы данного блока можно найти в технической литературе и справочных данных к элементам MatLab [88-90].

При описании следующего блока используем рассчитанные в начале главы параметры системы. Для выделения линии тренда электромеханического момента электропривода в качестве фильтра низких частот воспользуемся апериодическим звеном первого порядка с коэффициентом при p равным механической постоянной времени электропривода.

Передаточная функция фильтра низких частот примет вид:

$$W_1 = \frac{1}{0.0323 p + 1} \quad (2.42)$$

Для выделения линии тренда фазных токов, коэффициентом при p выберем электромагнитную постоянную времени электропривода.

$$W_2 = \frac{1}{0.0323 p + 1} \quad (2.43)$$

На рисунке 2.21 приведено строение блока обработки данных.

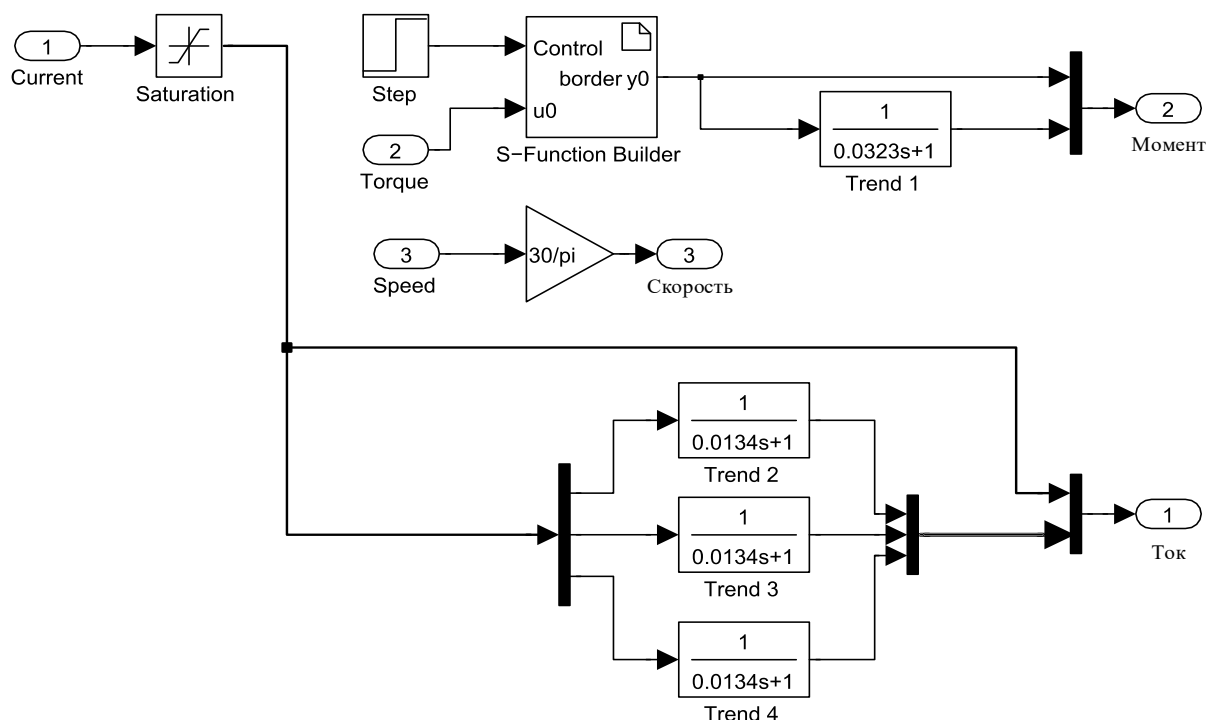


Рисунок 2.21. Строение блока обработки данных

Данный блок предназначен для обработки данных перед тем, как выводить их на осциллограф. Обрабатывается три параметра, ток, частота вращения и электрохимический момент. Как известно вентильно-индукторный электродвигатель имеет пульсирующие характеристики тока и момента. Поэтому для более наглядного исследования необходимо дополнительно выделять усредненное значение линии тренда, для точного анализа провалов характеристик. Как описано выше для этого используем параметры системы в составе апериодических звеньев 1-го порядка. Для обработки скорости нам необходим элемент Gain позволяющий нам перевести значение частоты вращения из рад/с в об/мин.

2.5.2. Имитационная модель отказоустойчивого двухсекционного трехфазного вентильно-индукторного электропривода.

После проверки работоспособности односекционной модели, на её основе реализуется многосекционная модель, имеющая в своем составе n одинаковых секций статорных обмоток на одном валу, систему управления (СУ),

преобразователь частоты (ПЧ) состоящий из m преобразовательных ячеек, состоящих из стандартного инвертора (рисунок.2.17), датчика положения (ДП) формирующего сигналы для управления системой. Функциональная схема вентильно-индукторного электропривода приведена на рисунок 2.22.

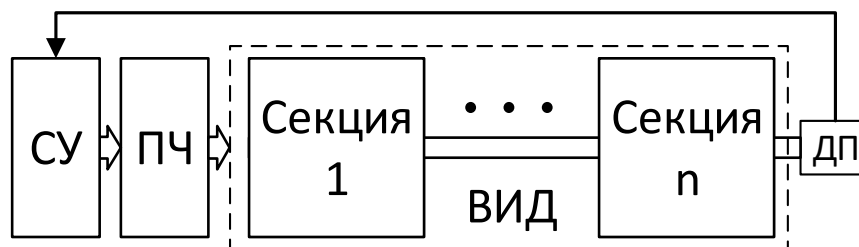


Рисунок 2.22. Функциональная схема многосекционного вентильно-индукторного электропривода

В двухсекционном электроприводе каждая секция может рассматриваться как независимая обмотка, что является особенностью данного типа электродвигателей. Работа электропривода осуществляется за счет сигналов, поступающих с датчика положения в систему управления в которой микроконтроллер на основе сигналов с соответствующих датчиков тока каждой фазы формирует задание на ток для преобразователя частоты. Преобразователь частоты, состоящий из m преобразовательных ячеек, осуществляет коммутацию IGBT транзисторов тем самым обеспечивая поочередное питание фаз каждой секции электродвигателя. В нашем случае будет рассмотрен вариант модели трехфазного двухсекционного вентильно – индукторного электропривода с имитацией обрыва фазы или несрабатывания ключа преобразовательной ячейки с дальнейшим запуском алгоритма восстановления на основе горячего резерва [23, 26, 32].

Построение имитационной модели двухсекционного электропривода происходит аналогично и состоит преимущественно из тех же самых блоков. Разница заключается в том, что необходимо обеспечить независимое управление каждой секцией электродвигателя, смоделировать два двигателя на одном общем валу, обеспечить две независимых обратных связи по току, одну общую обратную связь по скорости и сформировать свой алгоритм

отказоустойчивого управления для формирования фазных токов каждой фазы вентильно-индукторного электродвигателя. Блок алгоритмического управления для двухсекционного ВИП примет вид как показано на рисунке 2.23.

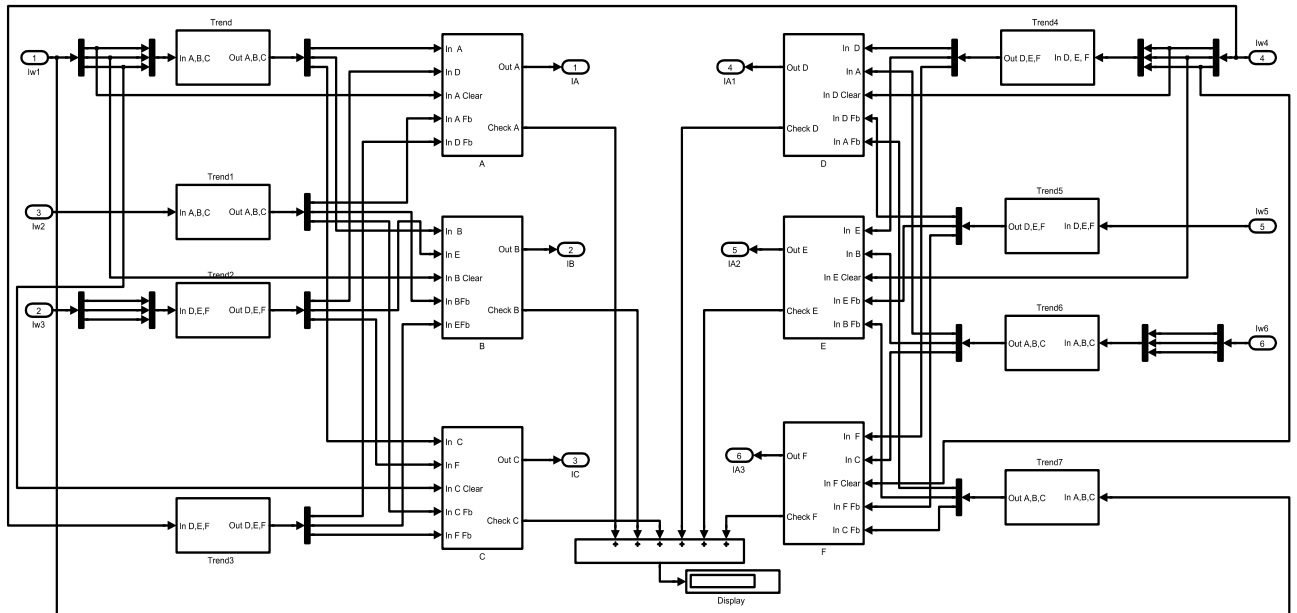


Рисунок 2.23. Строение блока алгоритмического управления двухсекционным ВИД.

Для обеспечения алгоритмического управления формируется специальный алгоритм для каждой из фаз на основании сигналов с датчика тока, сигналов формирования фазных токов фаз каждой фазы и их сравнения друг с другом. Также имеется краткая оценка количества оставшихся в работе фаз реализуемая через счетчик (Check). Внешний вид блока S-Function builder с входными и выходными сигналами показан на рисунке 2.24.

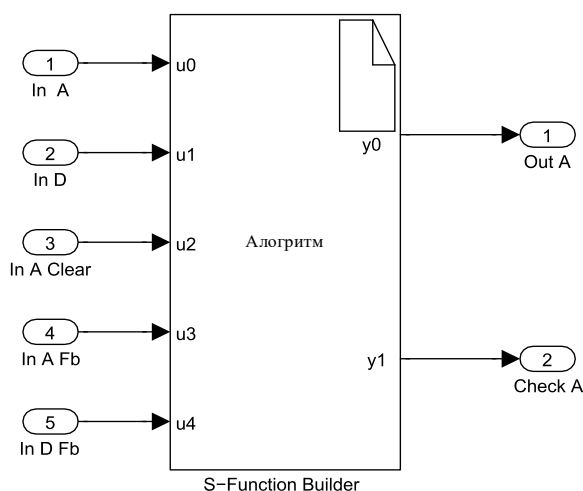


Рисунок 2.24. Внешний вид блока S-Function builder с входными и выходными сигналами

Ниже приведен код алгоритма управления диагностики и подсчета оставшихся в работе фаз для одной фазы А:

```

if (fabs(u0[0]-u1[0]) >= 0 && fabs(u0[0]-u1[0]) < 0.05*u0[0] && u3[0] > 0 &&
u4[0] > 0) y0[0] = u2[0];
if (fabs(u0[0]-u1[0]) >= 0 && u3[0] > 0 && u4[0] == 0) y0[0] = u2[0];
if (fabs(u0[0]-u1[0]) >= 0.05*u0[0] && u3[0] == 0) y0[0] = 0;
if (fabs(u0[0]-u1[0]) == 0 && u3[0] == 0) y0[0] = 0;
if (fabs(u0[0]-u1[0]) == 0 && u3[0] == 0 && u4[0] <= 0.05*u1[0]) y1[0] = 0;
if (fabs(u0[0]-u1[0]) > 0.05*u0[0] && u3[0] <= 0.05*u0[0]) y1[0] = 0;
if (fabs(u0[0]-u1[0]) <= 0.05*u0[0] && u3[0] >= 0.05*u0[0]) y1[0] = 1;

```

Общий вид имитационной модели двухсекционного отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода приведен на рисунке 2.25.

2.5.3. Имитационная модель ЭЦН на базе ВИП

Произведем расчет параметров для подбора установки центробежного насоса к нефтяной скважине. Для этого воспользуемся методикой инженерного расчёта, приведенного в [47, 49]. В качестве исходных параметров для расчёта возьмем параметры реальной нефтяной скважины из [46].

Плотность нефти при стандартных условиях:	$\rho_{\text{н}} = 820 \text{ кг/м}^3$
Плотность попутной воды:	$\rho_{\text{в}} = 920 \text{ кг/м}^3$
Дебит скважины:	$Q_{\text{с}} = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$
Объемная доля попутной воды:	$b = 0,30$
Газовый фактор нефти:	$G = 38$
Объемный коэффициент нефти:	$b_{\text{н}} = 1,12$
Глубина расположения пласта:	$L = 2000 \text{ м}$
Средний угол между осью ствола скважины и вертикалью:	$\varphi = 12^\circ$
Пластовое давление:	$N_{\text{пл}} = 1,8 \text{ МПа}$
Давление насыщения нефти попутным газом:	$N_{\text{нас}} = 3,4 \text{ МПа}$
Коэффициент продуктивности скважины:	$K = 7,5 \text{ м}^3/\text{МПа} \cdot \text{сут}$
Внутренний диаметр обсадной колонны:	$D_{\text{вн}} = 0,144 \text{ м}$
Устьевое давление:	$N_{\text{у}} = 4,0 \text{ МПа}$
Плотность попутного газа при стандартных условиях:	$\rho_{\text{т}} = 1,15 \text{ кг/м}^3$
Вязкость нефти:	$\mu_{\text{н}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$

Объемно – расходное газосодержание $Y = 0,15$

Коэффициент, учитывающий влияние на напор

насоса попутного газа и вязкости нефти $K_B = 0,87$

диаметр насосно-компрессорных труб $D_{\text{НКТ}} = 0,062 \text{ м}$

Произведем подбор параметров УЭЦН, для этого сначала определим плотность водогазонефтяной смеси:

$$\rho_{\text{см}} = (\rho_{\text{в}} \cdot b + \rho_{\text{н}} \cdot (1 - b)) \cdot (1 - Y) + \rho_{\text{т}} \cdot Y, [\text{кг/м}^3] \quad (2.44)$$

Определяем забойное давление, необходимое для обеспечения заданного дебита скважины:

$$N_{\text{ЗАБ}} = N_{\text{ПЛ}} - \frac{Q}{K}, [\text{МПа}] \quad (2.45)$$

Глубина расположение динамического уровня для заданного дебита скважины:

$$H_{\text{ДИН}} = L - \frac{N_{\text{ЗАБ}}}{\rho_{\text{см}} \cdot g}, [\text{м}] \quad (2.46)$$

Давление на приеме насоса, при котором значение газосодержания на входе в насос не превышает заданного значения:

$$N_{\text{ПР}} = N_{\text{НАС}} \cdot (1 - Y), [\text{МПа}] \quad (2.47)$$

Глубина подвески насоса по вертикали:

$$H_{\text{ПОДВ}} = H_{\text{ДИН}} - \frac{N_{\text{ПР}}}{\rho_{\text{см}} \cdot g}, [\text{м}] \quad (2.48)$$

Глубина спуска насоса по оси скважины:

$$L_{\text{СП}} = \frac{H_{\text{ПОДВ}}}{\cos(\varphi)}, [\text{м}] \quad (2.49)$$

Теперь определим основные параметры, требуемые для подбора ЭЦН. Необходимый напор насоса при работе на воде:

$$H_B = \left[L - \frac{10^6}{\rho_{\text{см}} \cdot g} \cdot (N_{\text{ЗАБ}} - N_y) - 160 D_{\text{НКТ}} \cdot G \cdot (1 - b) \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\frac{N_y}{N_{\text{НАС}}}} \right) \right] \cdot K_B^{-1}$$

Подача которую должен иметь насос:

$$Q_B = \frac{Q_c}{K_g} [\text{м}^3/\text{сут}] \quad (2.50)$$

K_g -коэффициент изменения подачи при работе на нефтегазовой смеси относительно водяной характеристики. Выбирается в диапазоне от 0,8 до 0,9, примем $K_g = 0,85$.

Полезную мощность требуемого электродвигателя определяем по формуле:

$$P_{\text{гид}} = \frac{Q_B \cdot \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H_B}{86400 \cdot 1000 \cdot \eta}$$

Принимая кпд ЭЦН $\eta = 40\%$

Воспользовавшись MathCad рассчитаем требуемые параметры, тогда:

$$H_B = 2214 [\text{м}], Q_B = 117,647 [\text{м}^3/\text{сут}], P_{\text{гид}} = 56,966 \text{ кВт}$$

Для сравнения посмотрим из каталогов [48] ближайший подходящий по мощности и насосным характеристикам ЭЦН. Насос ЭЦНа(К)5а-125(Тв), имеет характеристики: напор 2500 [м], подача 125 [м³/сут], мощность 62,01 кВт. Соответственно при моделировании ПЭД с ЦН при аналогичной мощности двигателя (ВИД) 60кВт, получим примерно соответствующие характеристики напора и подачи. При моделировании используем силовой кабель КПБП длиной 2000 [м]. Данный кабель имеет токопроводящую шину диаметром 4,5 [мм] и сечением 16 [мм²]. Воспользовавшись уравнениями (2.16), рассчитаем значения погонного продольного активного сопротивления кабеля, индуктивности единицы длины двухпроводного кабеля, емкости единицы длины двухпроводного кабеля при близком расположении токопроводящих жил и волновое сопротивление кабеля.

Соединительный кабель учтен π линией с распределенными параметрами: погонное сопротивление $R_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Ом}}{\text{м}} \right]$, погонная индуктивность $L_0 = 6,162 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right]$, погонная емкость $C_0 = 5,917 \cdot 10^{-11} \left[\frac{\text{Ф}}{\text{м}} \right]$, волновое сопротивление $Z_c = 187,755 - j157,624$, длина кабеля 2 [км].

Структурная схема имитационной модели ЭЦН с ВИД показана на рисунке 2.26:

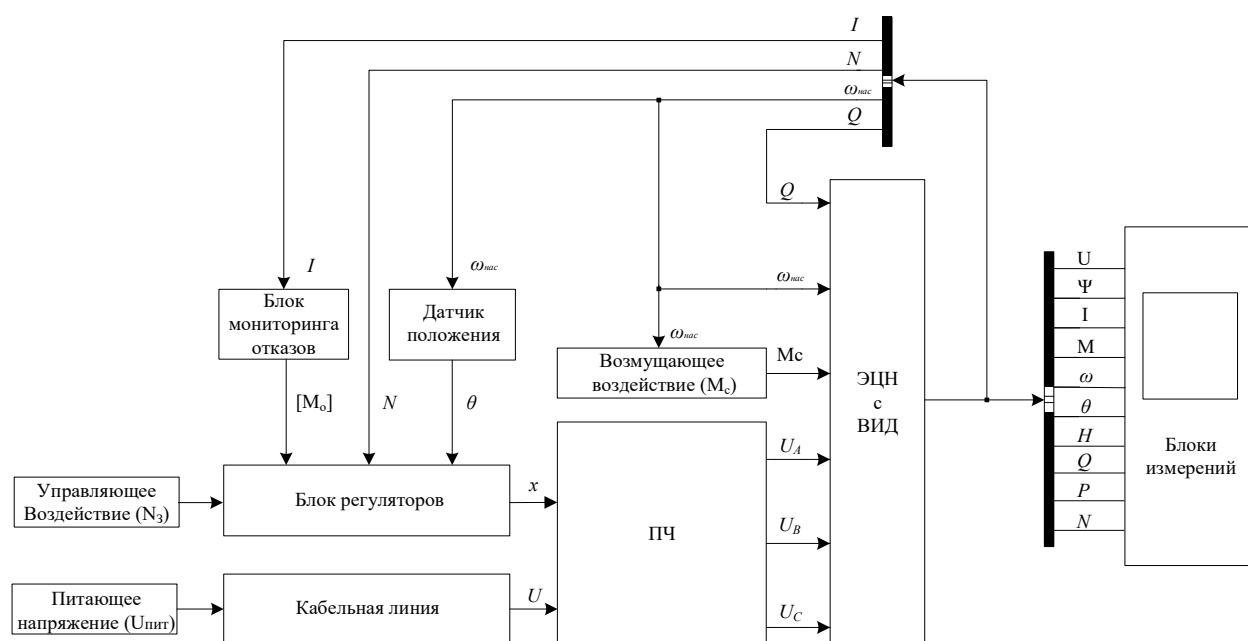


Рисунок 2.26. Структурная схема имитационной модели ЭЦН с ВИД

Рассмотрим подробнее основные блоки модели. Блоки ПЧ и «датчик положения» рассмотрены в предыдущем пункте. Блок «Кабельная линия» представляет собой модель, показанную на рисунке 2.27.

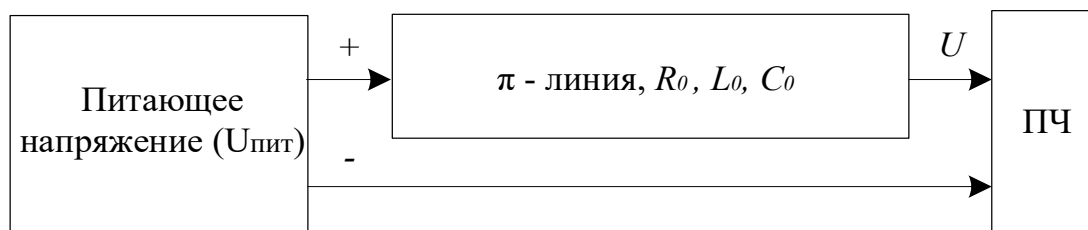


Рисунок 2.27. Строение блока «кабельная линия»

Блок регуляторов представляет собой (рисунок 2.28):

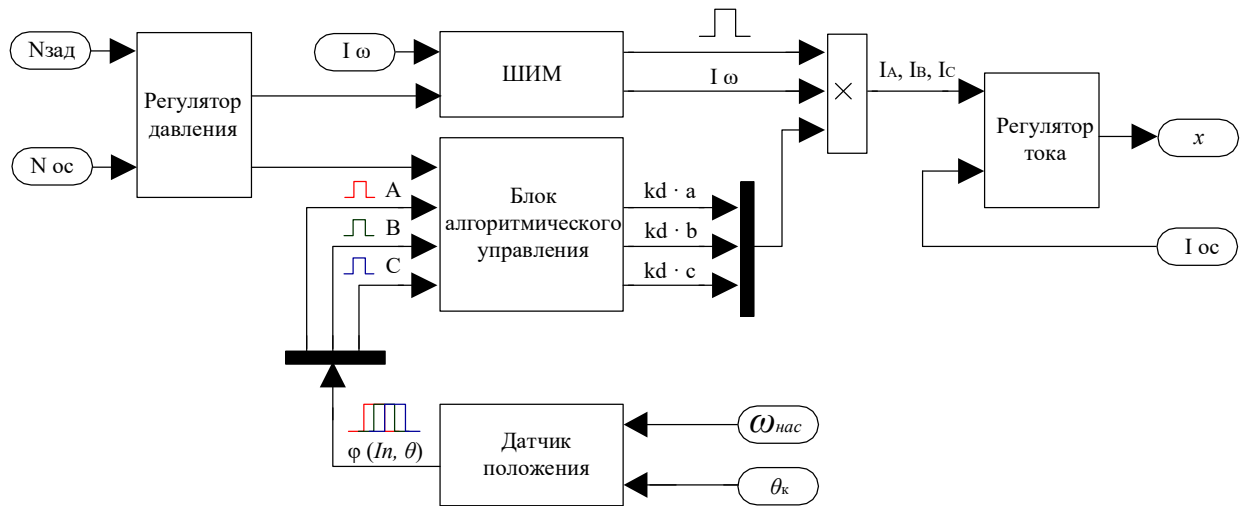


Рисунок 2.28. Строение блока регуляторов

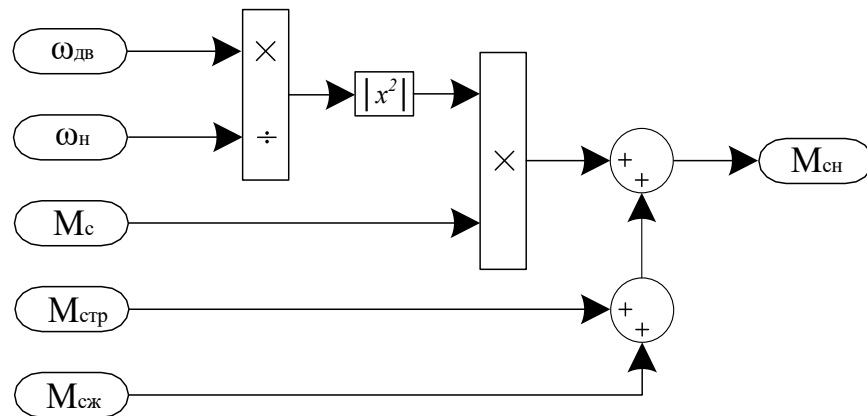
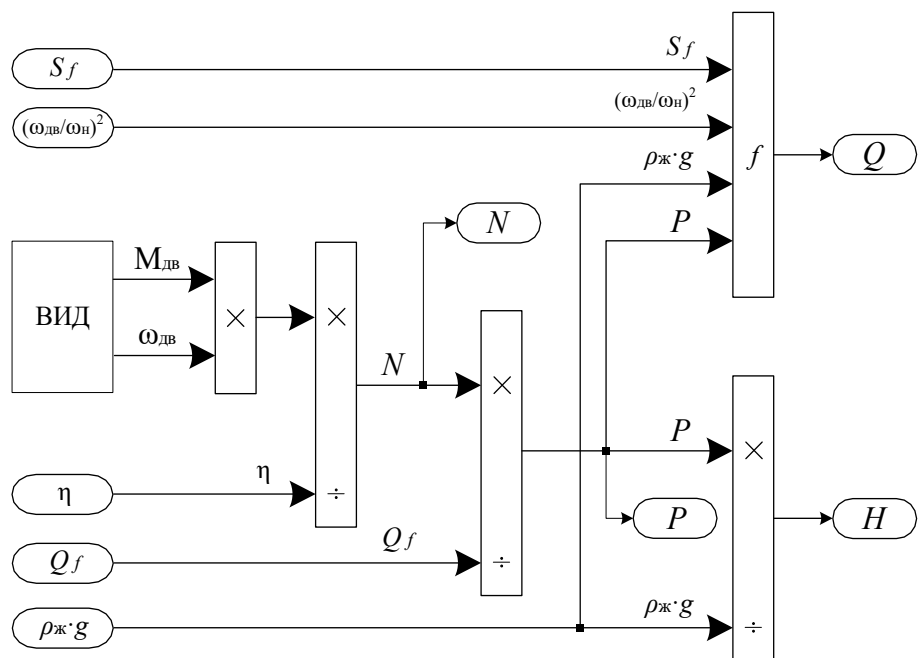


Рисунок 2.29. Блок расчёта параметров ЭЦН.



2.30. Блок измерений.

2.5.4. Имитационная модель ТС

Для проверки работоспособности вентильно-индукторного электропривода электромобиля в различных режимах работы создадим имитационную модель в среде моделирования MatLab Simulink, для этого воспользуемся [1-3, 54-56].

За исходную модель была принята модель 3-х фазного вентильно-индукторного электропривода с 6 полюсами на статоре и 4-мя на роторе рассмотренную в 2.1.

Выберем предустановленную модель двигателя на 60 кВт, добавим несколько блоков для моделирования работы электромобиля в нормальных и неполнофазных режимах работы. А также видоизменим систему управления уйдя от релейного к широтно-импульсному регулированию.

Внешний вид имитационной модели односекционного отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода транспортного средства приведен на рисунке 2.30.

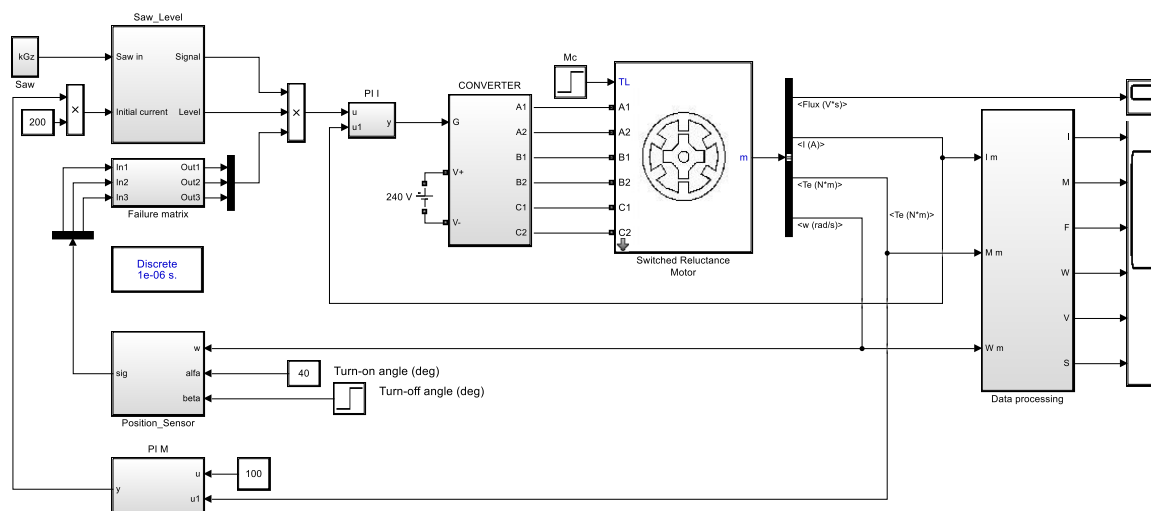


Рисунок 2.31. Имитационная модель ВИД с ТС в Matlab

Текущий сигнал скорости преобразуется при помощи интегрирования в угол положения и переводится в градусы. Далее с помощью блока mod приводится к диапазону (0...360) град.

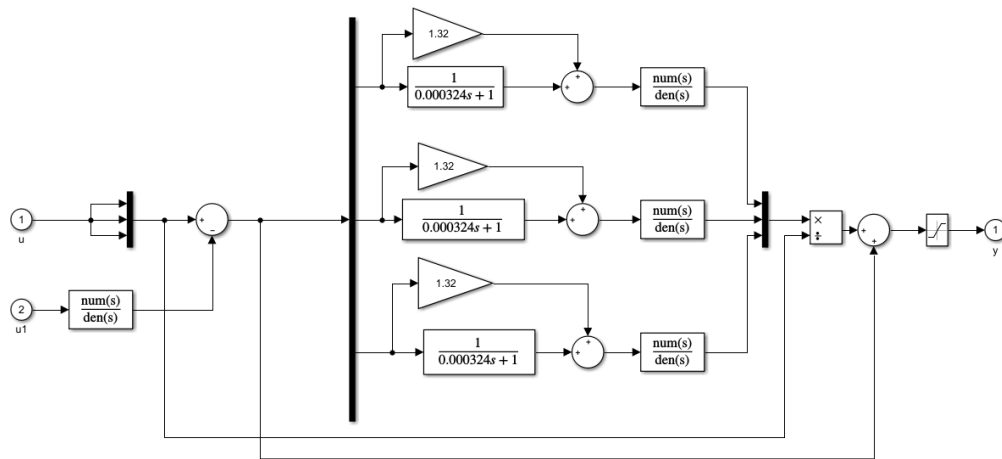


Рисунок 2.32. Блок ПИД регулятора

Обработанный сигнал сравнивается с сигналами с портов α и β . В случае, если угол больше угла включения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; если угол меньше угла выключения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; иначе – ноль. После этого сигналы поступают на блок логического. И, единица на выходе, которого (порт sig) появляется только в случае одновременного поступления единичных сигналов на вход. Этот сигнал является управляющим для включения/выключения транзисторов ИН [21].

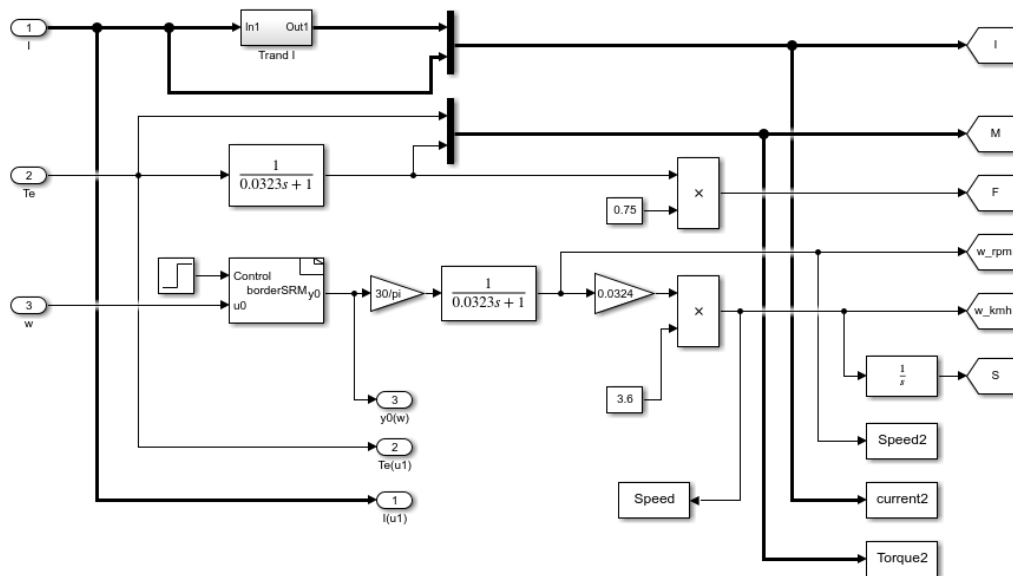


Рисунок 2.33. Вид подсистемы Data acquisition

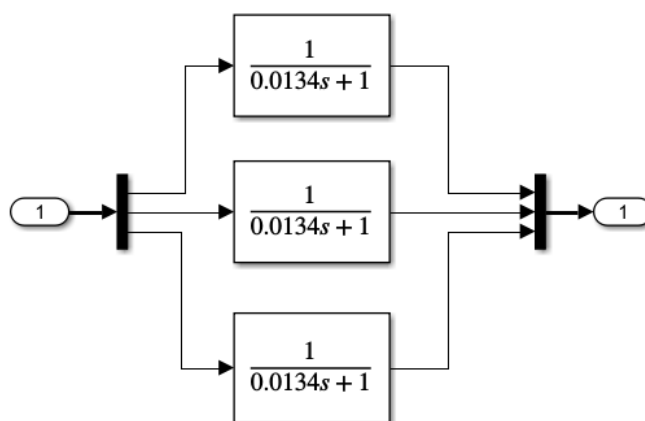


Рисунок 2.34. Подсистема «Trand I»

На рисунке 2.33 приведено строение блока обработки данных. Блок предназначен для обработки данных перед тем как выводить их на осциллограф. Как известно вентильно-индукторный электродвигатель имеет пульсирующие характеристики тока и момента. Поэтому для более наглядного исследования необходимо дополнительно выделять усредненное значение линии тренда, для точного анализа провалов характеристик. Как описано выше для этого используем параметры системы в составе аperiodических звеньев 1-го порядка. Для обработки скорости нам необходим элемент Gain позволяющий нам перевести значение частоты вращения из рад/с в об/мин. Полученное значение с помощью блока Gain переводится в м/с, а затем в км/ч. Перемещение получаем путем интегрирования скорости по времени. Все данные выводятся на осциллограф (рисунок 2.34).

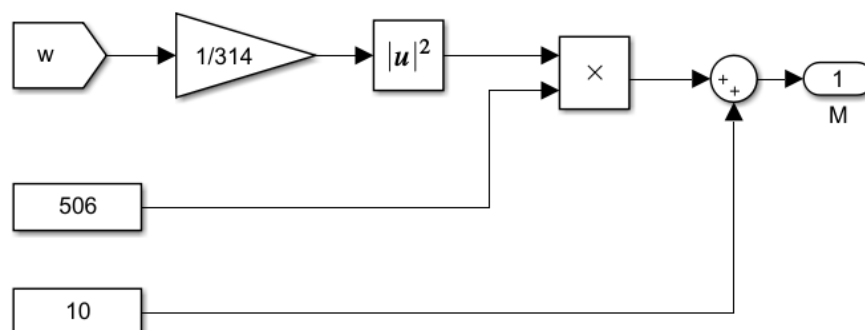


Рисунок 2.35. Преобразования параметров электромобиля к моменту, подводимому к двигателю

$$M = M_{\text{сцепления}} + J_{\text{эл}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (2.51)$$

где $M_{\text{сцепления}}$ - момент, учитывающий сцепление с дорогой, $J_{\text{эл}}$ - момент инерции электромобиля, $\omega_{\text{дв}}$ - текущая скорость электромобиля, $\omega_{\text{ном}}$ - номинальная скорость электромобиля

Момент инерции электромобиля согласно [59] определяется как:

$$J_{\text{эл}} = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2) \quad (2.52)$$

где m – масса электромобиля, a – длина электромобиля, b – ширина электромобиля

$$J_{\text{эл}} = \frac{1}{12} \cdot 1100 \cdot (4.4^2 + 1.65^2) = 2024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Учитывая, что расчет производится для одного мотор-колеса, а в электромобиле будет применяться 4, то

$$J_{\text{эл}} = \frac{2024}{4} = 506 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\text{Итоговый момент инерции } M = 10 + 506 \cdot \left(\frac{\omega_{\text{дв}}}{314} \right)^2$$

Выводы по главе 2

Разработаны математическая и имитационная модель, позволяющие исследовать аварийные режимы в односекционном и двухсекционном вентильно-индукторном электроприводе. А также математическая и имитационная модели ЭЦН и ТС с ВИД в качестве исполнительного двигателя, позволяющие рассматривать работу этих механизмов в аварийных и неполнофазных режимах работы.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ МОНИТОРИНГА И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.

3.1. Алгоритм мониторинга фазных токов вентильно-индукторного электродвигателя и формирование матриц отказов.

Решение задачи обеспечения отказоустойчивого управления предполагает мониторинг в реальном времени технического состояния электропривода с выработкой соответствующих битов в матрице отказов в случае неполнофазной работы электропривода и последующего полного или частичного восстановления работоспособности с использованием алгоритма отказоустойчивого управления. Необходимый запас по вычислительному ресурсу для реализации мониторинга состояния электропривода и последующего восстановления обеспечивается информационным резервом.

Для обеспечения отказоустойчивости электропривода необходимо своевременно производить диагностику системы на основе анализа фазных токов. Для обеспечения функционирования отказоустойчивого алгоритма требуется, чтобы каждая m -фазная обмотка двухсекционного ВИД поочередно запитывалась однополярным импульсом тока. На основании сигналов с датчиков токов формируются биты отказов отдельно для каждой секции m -фазного двухсекционного вентильно-индукторного электропривода (ВИП): $\bar{a}_{1i}$, $\bar{a}_{2i}$, $i=(X_1=A), (X_2=B), (X_3=C), \dots, (X_m)$, по результатам анализа мгновенных значений амплитуды фазных токов секций электродвигателя, где X – индекс фазы. Соответственно для первой секции, если $|I_{13i} - I_{1oci}| \geq \delta$, то выявляют отказ i -фазы первой секции, и на основании анализа формируется бит отказа имеющий значение логического нуля или единицы: $a_{1i}=1$, $\bar{a}_{1i}=0$, что позволяет сформировать матрицу битов отказов для анализируемой секции. Аналогично для второй секции электродвигателя, если $|I_{23i} - I_{2oci}| \geq \delta$, то выявляют отказ i -фазы второй секции: $a_{2i}=1$, $\bar{a}_{2i}=0$. Здесь: I_{13i} – заданные значения мгновенной

амплитуды формируемых фазных токов для i -фазы первой секции; I_{2zi} – заданные значения мгновенной амплитуды формируемых фазных токов для i -фазы второй секции; δ – допустимая ошибка работы регулятора тока [6].

Рассмотрим пример, когда произойдет отказ фазы А первой секции ВИП. Временная диаграмма формирования бита отказа на основании анализа фазного тока фазы А первой секции показана на рисунок 3.1. Для этого воспользуемся имитационной моделью ВИП подробно рассмотренной в [2, 3, 23].

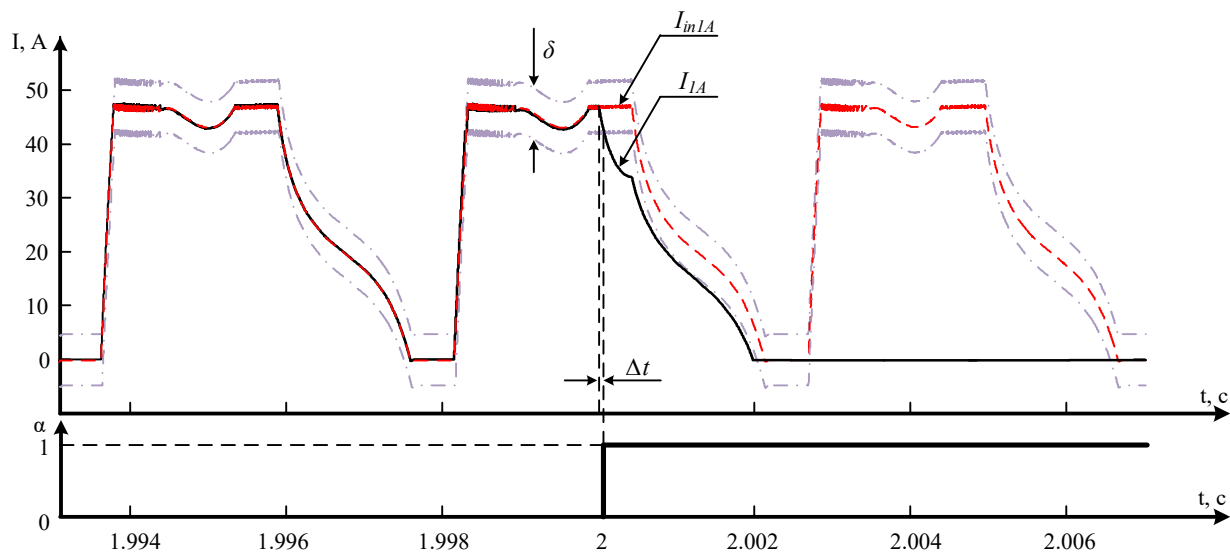


Рисунок 3.1. Временная диаграмма формирования бита отказа одной фазы секции. I – ток, А; α – логический сигнал характеризующий работоспособность фазы (бит отказа).

Здесь: δ – допустимая ошибка работы регулятора тока (зона 10% отклонения), I_{in1A} – ток задания для фазы А 1-й секции, I_{1A} – текущий фазный ток фазы А 1-й секции с датчика тока, α – бит отказа, Δt – интервал времени от начала аварийного отключения фазы двигателя до момента окончания анализа тока фазы и выработки бита отказа.

В этом случае матрица отказов примет вид:

$$\alpha_{ni} = \begin{bmatrix} \overline{a_1} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b_1} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c_1} \\ \overline{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b_2} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Соответственно матрица фазных токов двухсекционного ВИП при отказе фазы А в 1-й секции примет вид:

$$I_{ni} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{1B} \cdot \overline{b_1} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1C} \cdot \overline{c_1} \\ I_{2A} \cdot \overline{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2B} \cdot \overline{b_2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2C} \cdot \overline{c_2} \end{bmatrix};$$

Тогда матрица моментов двухсекционного ВИП при отказе фазы А в 1-й секции примет вид:

$$M_{ni} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{1B}(i_{1B} \cdot \overline{b_1}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & M_{1C}(i_{1C} \cdot \overline{c_1}, \alpha) \\ M_{2A}(i_{2A} \cdot \overline{a_2}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & M_{2B}(i_{2B} \cdot \overline{b_2}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & M_{2C}(i_{2C} \cdot \overline{c_2}, \alpha) \end{bmatrix};$$

Момент двигателя при отказе фазы А в 1-й секции примет вид:

$$M_{\text{ос}} = M_{nX_1} + M_{nX_2} + \dots + M_{nX_m} = \\ 0 + M_{1B}(i_{1B} \cdot \overline{b_1}, \alpha) + M_{1C}(i_{1C} \cdot \overline{c_1}, \alpha) + M_{2A}(i_{2A} \cdot \overline{a_2}, \alpha) + M_{2B}(i_{2B} \cdot \overline{b_2}, \alpha) + M_{2C}(i_{2C} \cdot \overline{c_2}, \alpha)$$

Соответственно при отказах в других фазах и секциях матрица отказов будет меняться в соответствии с текущим состоянием ВИП. Двухсекционный трехфазный ВИП имеет 64 рабочих и аварийных состояний (таблица 3.1).

Поэтому система управления электроприводом уже содержит в памяти управляющего контроллера все рабочие и аварийные состояния ВИП, что

[illegible]

3.2. Алгоритмы отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных режимах работы

Работа алгоритмов отказоустойчивого управления основывается на формировании задания на фазные токи секций в соответствии с данными, полученными после мониторинга ВИП. А также на формировании угла открытия тиристоров для обеспечения необходимой зоны перекрытия токов.

В общем случае управление ВИП осуществляется путем поочередной коммутации фаз двигателя на основании информации, получаемой с датчика положения ротора. Известны следующие виды коммутации [32]: симметричная одиночная (рис. 3.2, а), симметричная парная и несимметричная одиночная (рис. 3.2, б).

На рис. 3.2 обозначено: А, В, С – индексы фаз; t_1 , t_2 , t_3 – интервалы времени коммутации каждой из фаз; T – период коммутации.

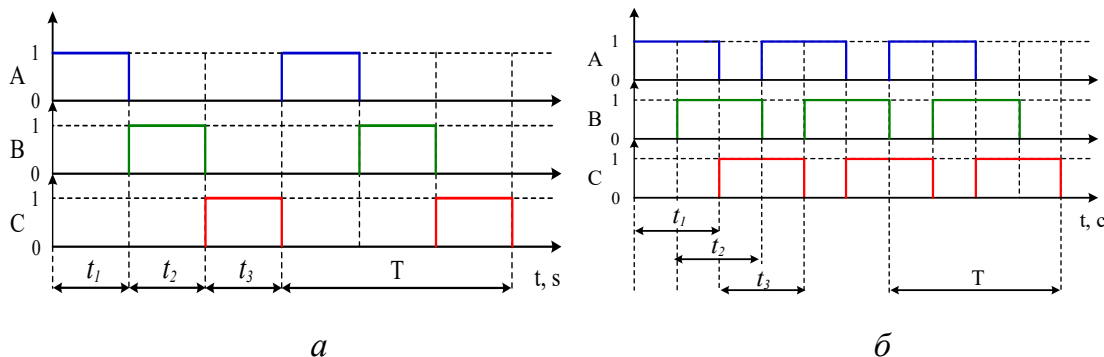


Рисунок 3.2. Диаграммы управления коммутацией при симметричной одиночной (а) и несимметричной одиночной коммутации фаз (б)

Перекрытия фаз при симметричной одиночной коммутации (рис. 3.2 а) отсутствует. С несимметричной одиночной коммутацией (рис. 3.2 б) перекрытие фаз производится с углом перекрытия: $\alpha_k = \pi/4$.

На рисунке 3.3 приведены алгоритмы отказоустойчивого управления ВИД с компенсацией момента выбывающих из работы фаз двигателя для одно и двухсекционного ВИД.



Рисунок. 3.3. Алгоритмы отказоустойчивого управления ВИД

3.2.1. Алгоритм управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет применения угла перекрытия фаз

Формируются мгновенные значения фазных токов ВИД для векторов токов фаз по выражениям:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_\omega \bar{a} [1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \alpha) - \varphi(t) + \bar{d}\alpha_k)]; \\
 I_B &= I_\omega \bar{b} [1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \alpha) - \varphi(t) + \bar{d}\alpha_k)]; \\
 I_C &= I_\omega \bar{c} [1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \alpha) - \varphi(t) + \bar{d}\alpha_k)],
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где I_ω – значение амплитуды формируемых фазных токов; α – электрический угол ротора в радианах; $\varphi(i, \alpha)$ – значения формируемого угла для каждой фазы и секции; $\varphi(t)$ – мгновенное значение угла датчика положения ротора, α_k – угол коммутации (перекрытия). На рисунке 3.4 и 3.5 показаны варианты применения углов перекрытия 30 и 45 градусов соответственно.

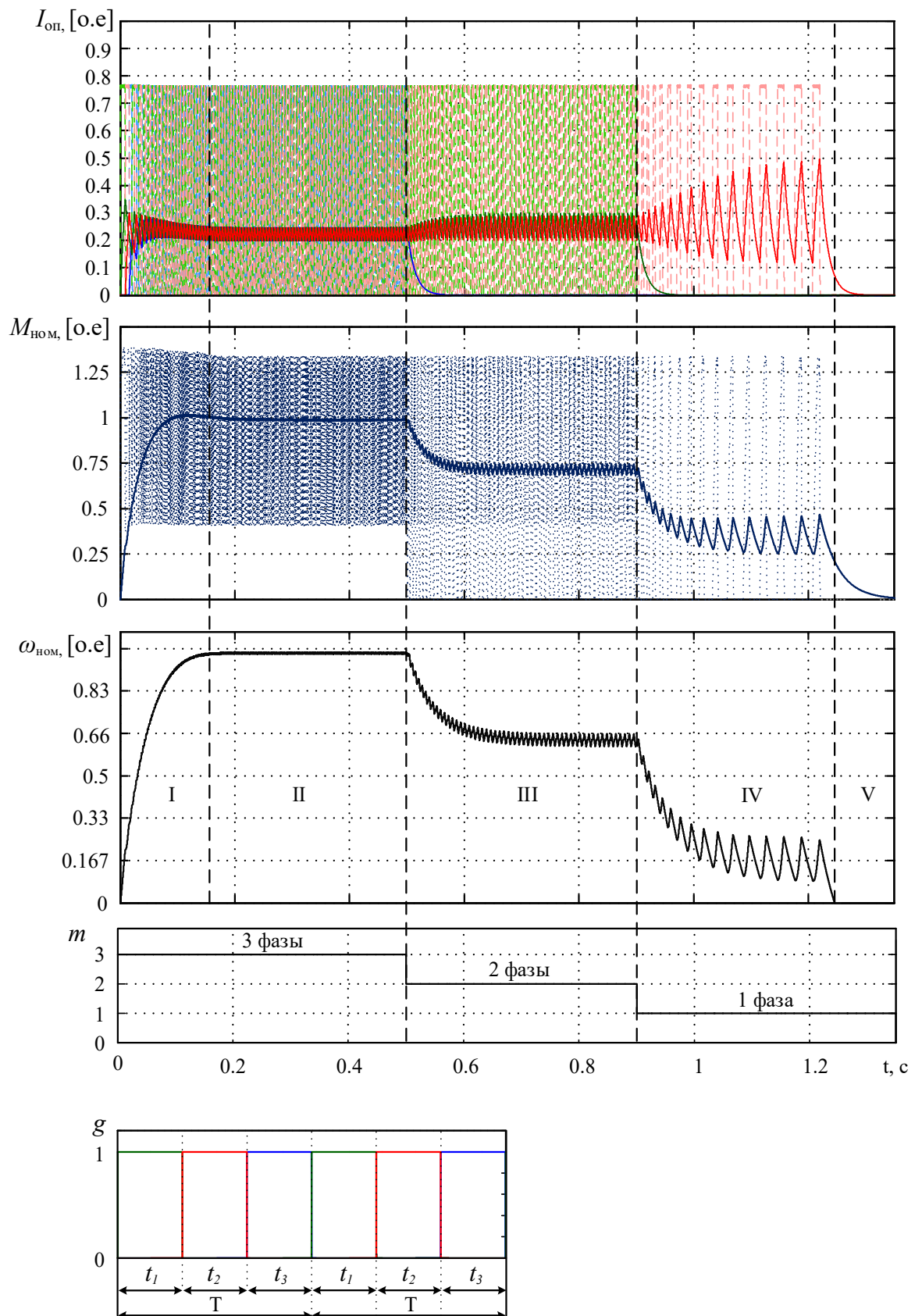


Рисунок 3.4. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода при угле перекрытия 30°

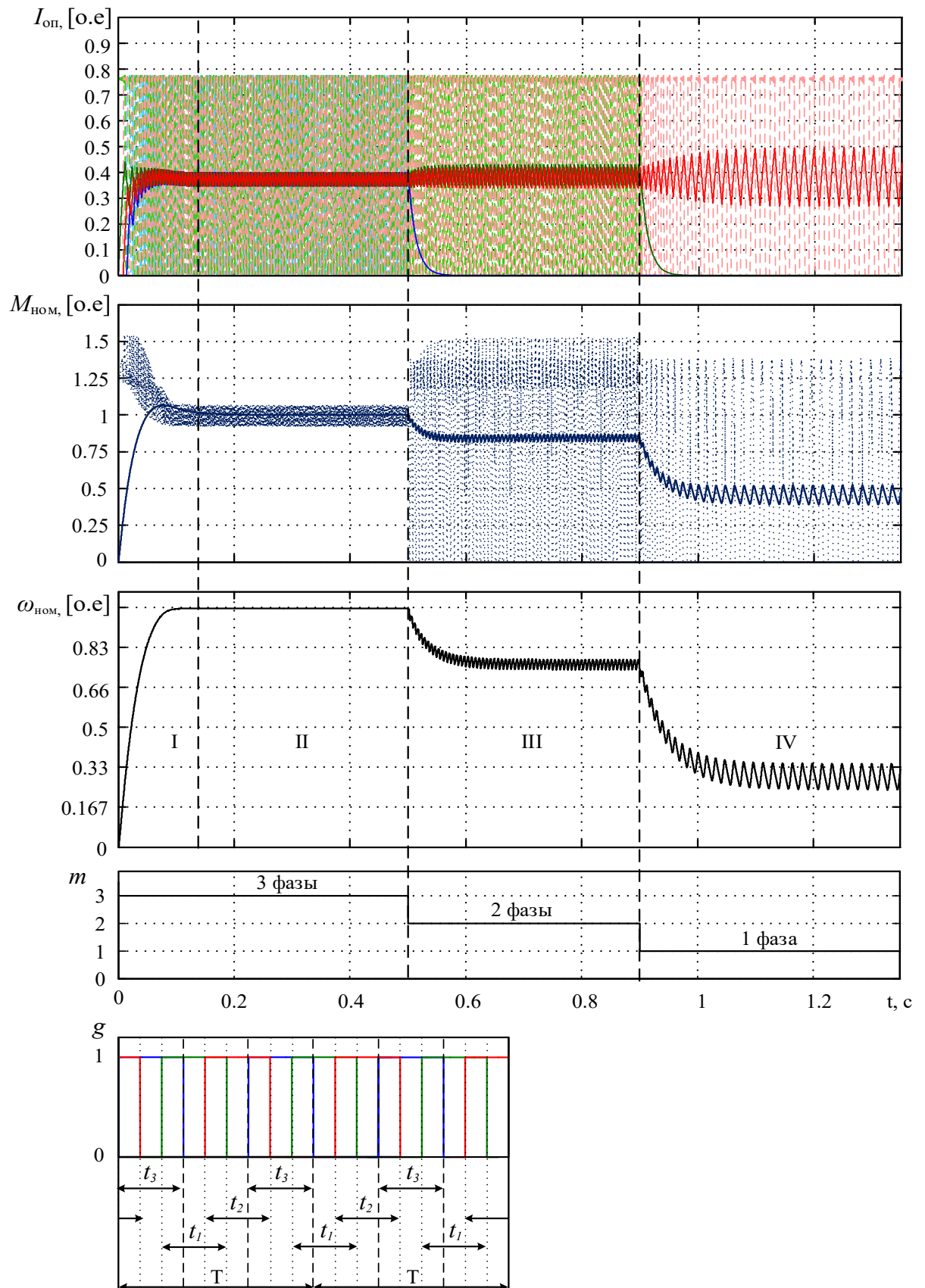


Рисунок 3.5. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода при угле перекрытия 45°

По рисунку 3.4 можно сказать, что при использовании угла перекрытия 30 электрических градусов при обрыве фаз значительно увеличивается амплитуда пульсаций токов оставшихся в работе фаз, а также величина провала момента и частоты вращения составляет более 30% на каждую отказавшую фазу. При этом при отказе двух фаз, двигатель не может длительное время продолжать функционирование на одной рабочей фазе и постепенно останавливается. Если же изменить угол перекрытия на 45 электрических градусов, то при обрыве фазы амплитуда пульсаций тока значительно меньше, а провал момента и частоты вращения около 20 % на каждую отказавшую фазу. При этом угле коммутации значительно ухудшается энергоэффективность системы, но повышается ее отказоустойчивость. При условии остаточной инерции механизма он сможет продолжить функционирование на одной оставшейся в работе фазе (если имеется минимум по 2 полюса на фазу).

Тем самым можно сказать, что используя алгоритмическое управление углом перекрытия возможно в случае отказа фазы переключать систему с одного угла перекрытия на другой при этом повышая ее отказоустойчивость.

3.2.2. Алгоритм управления односекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз

Формируются мгновенные значения фазных токов ВИД для векторов токов фаз по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \alpha) - \varphi(t))]; \\ I_B &= I_\omega \bar{b} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \alpha) - \varphi(t))]; \\ I_C &= I_\omega \bar{c} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \alpha) - \varphi(t))]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

где I_ω – значение амплитуды формируемых фазных токов; α – электрический угол ротора в радианах; $\varphi(i, \alpha)$ – значения формируемого угла для каждой фазы и секции; $\varphi(t)$ – мгновенное значение угла датчика положения ротора.

На рисунках 3.6 и 3.7 показан процесс плавного истощения рабочего ресурса электродвигателя без запуска алгоритма компенсации и с алгоритмом соответственно при обрыве одной фазы.

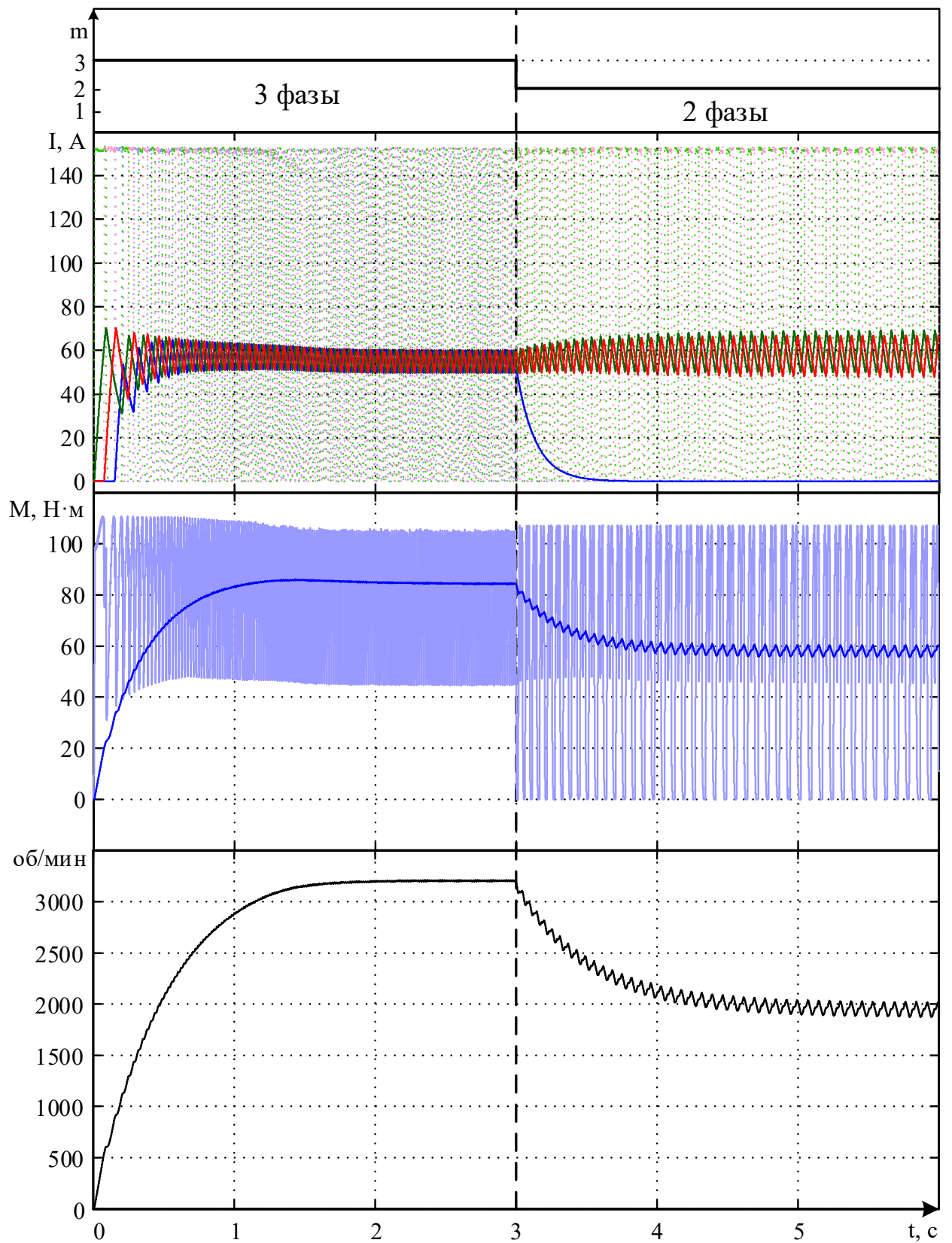


Рисунок 3.6. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода без компенсации тока при обрыве одной фазы.

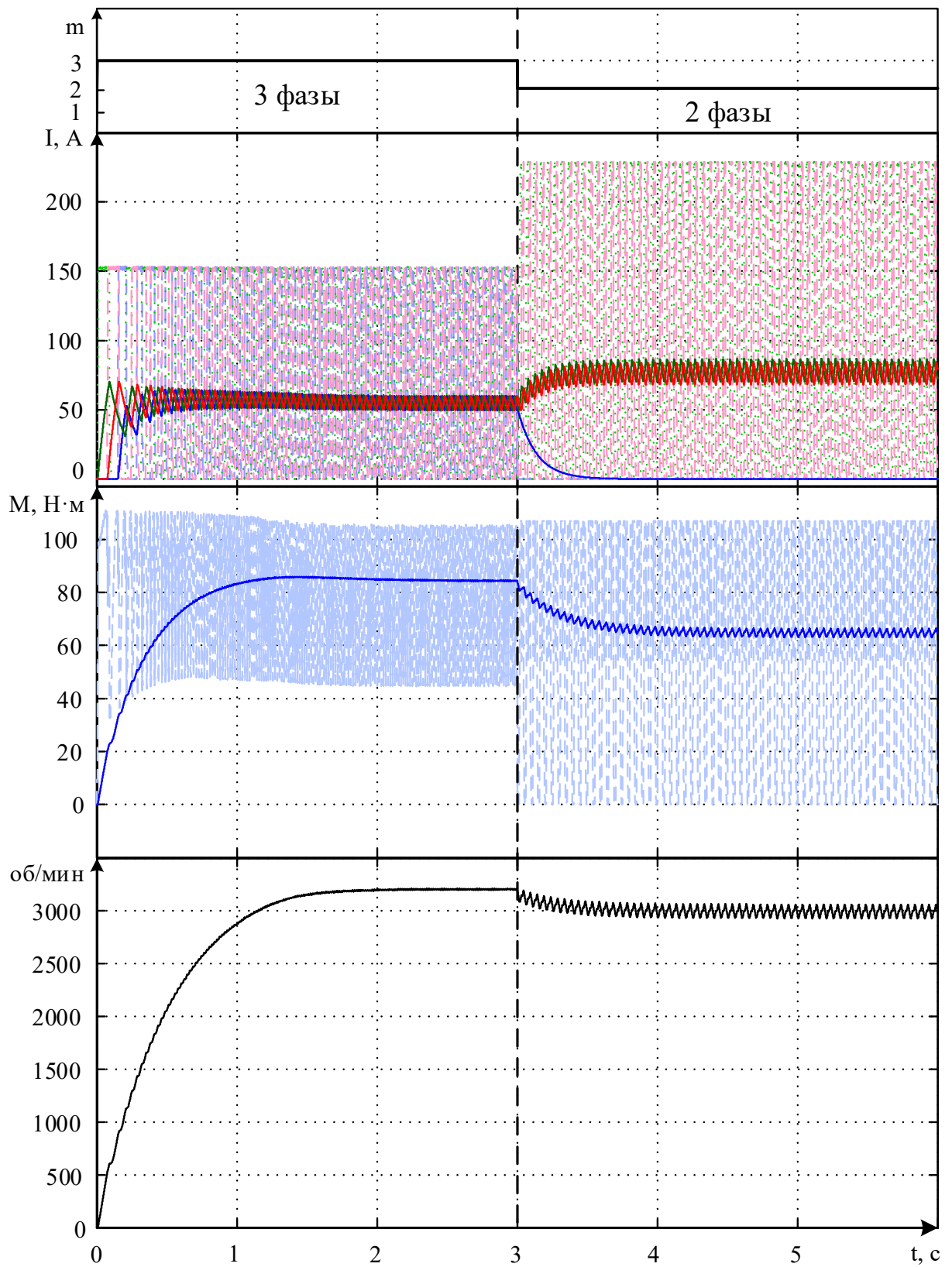


Рисунок 3.7. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода с запуском алгоритма компенсации тока при обрыве одной фазы

На рисунке 3.6 показан процесс постепенного истощения ресурса электродвигателя при переходе с 3-х фазного в 2-х фазный режим работы. Как видно из рисунка при обрыве фазы провал частоты вращения и электромагнитного момента составляет около 33%, а также наблюдается увеличение пульсаций амплитуды фазных токов оставшихся в работе фаз. На рисунке 3.7 показан тот же процесс только с запуском дополнительного алгоритма компенсации фазных токов на коэффициент 1,5 от номинального значения. Тем самым значение оставшихся фазных токов увеличивается в 1,5 раза. При этом видно, что пульсация амплитуд фазных токов значительно меньше, а величина провала электромагнитного момента составляет около 20%, частота вращения при этом практически полностью восстанавливается, провал составляет около 10%.

Тем самым можно сказать, что, используя алгоритм компенсации тока в оставшихся работоспособных фазах возможно значительно повысить отказоустойчивость электропривода и практически полностью восстановить его работоспособность и производительность. Эти режимы могут быть длительными в случае, если двигатель выбран с запасом по максимальному току, и кратковременным если это условие не выполняется. При этом двигатель сможет закончить назначенную ему рабочую функцию.

3.2.3. Алгоритм управления двухсекционным 3-фазным ВИП с компенсацией момента за счет увеличения амплитуд токов фаз

Алгоритм отказоустойчивого управления двухсекционным ВИП имеет вид:

$$\begin{aligned}
 I_{1A} &= I_{\omega} \overline{a1} (1 + \overline{a2}) \frac{2}{4^{\overline{a2}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1A}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{1B} &= I_{\omega} \overline{b1} (1 + \overline{b2}) \frac{2}{4^{\overline{b2}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1B}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{1C} &= I_{\omega} \overline{c1} (1 + \overline{c2}) \frac{2}{4^{\overline{c2}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1C}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{2A} &= I_{\omega} \overline{a2} (1 + \overline{a1}) \frac{2}{4^{\overline{a1}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{2B} &= I_{\omega} \overline{b2} (1 + \overline{b1}) \frac{2}{4^{\overline{b1}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2B}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{2C} &= I_{\omega} \overline{c2} (1 + \overline{c1}) \frac{2}{4^{\overline{c1}}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2C}, \alpha) - \varphi(t))],
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

где I_{1A} – значение амплитуды формируемых фазных токов; α – электрический угол ротора в радианах, $\varphi(i_{1A}, \alpha)$ – значение формируемого угла для фазы «А» 1-й секции; $\varphi(t)$ – мгновенное значение угла с датчика положения ротора.

При работоспособном состоянии ВИП, рассмотрим пример работы алгоритма (3.3) на примере одной фазы А:

$$\begin{aligned}
 I_{1A} &= I_{\omega} \cdot 1 \cdot (1+1) \cdot \frac{2}{4^1} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1A}, \alpha) - \varphi(t))] = I_{\omega} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1A}, \alpha) - \varphi(t))]; \\
 I_{2A} &= I_{\omega} \cdot 1 \cdot (1+1) \cdot \frac{2}{4^1} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \varphi(t))] = I_{\omega} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \varphi(t))];
 \end{aligned}$$

При аварийном состоянии ВИП формируются нулевые биты отказов соответствующих фаз секций электропривода, например рассмотрим отказ фазы А 1 секции, тогда $a_{1A}=0$, данная фаза блокируется и дальнейшего задания на фазный ток для нее не формируется, при этом для одноименной фазы второй

секции задание на ток формируется удвоенным, Тем самым исходя из (2.6, 2.7, 2.8) результирующий момент двигателя и частота вращения сохраняются на прежнем уровне Это возможно при условии, что многосекционная машина имеет запас по нагрузочному резерву при номинальной нагрузке. Необходимый запас по току обеспечивается нагрузочным резервом, что позволяет работать с номинальной нагрузкой при загруженности каждой секции на половину своей максимальной мощности.

При отказе фазы А первой секции, задание на фазные токи в соответствии с алгоритмом (3.3) примут вид:

$$I_{1A} = I_{\omega} \cdot 0 \cdot (1+1) \cdot \frac{2}{4^1} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1A}, \alpha) - \varphi(t))] = 0;$$

$$I_{2A} = I_{\omega} \cdot 1 \cdot (1+0) \cdot \frac{2}{4^0} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \varphi(t))] = 2 \cdot I_{\omega} \cdot [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \varphi(t))];$$

На основании предложенного алгоритма обеспечивается управление электроприводом при одиночных и множественных отказах без провалов по моменту и частоте вращения. При этом возможен расчёт коэффициента работоспособности, позволяющего оценивать для ВИП остаточный рабочий ресурс вплоть до полной потери работоспособности. Из уравнений (2.8) следует, что выходной момент двигателя будет изменяться прямо пропорционально числу остающихся в работе фаз. Так для нормального рабочего состояния $M_{\text{дв}} = M_{\text{дв.ном}}$, а для состояния с отказом одной фазы одной секции $M_{\text{дв}} = (1 - \frac{1}{6}) \cdot M_{\text{дв.ном}}$. На рисунках 3.8, 3.9, 3.10 показан процесс постепенного исчерпания рабочего ресурса двухсекционного вентильно-индукторного электропривода без запуска алгоритма, с запуском алгоритма отказоустойчивого управления и общий график, показывающий разницу между ними.

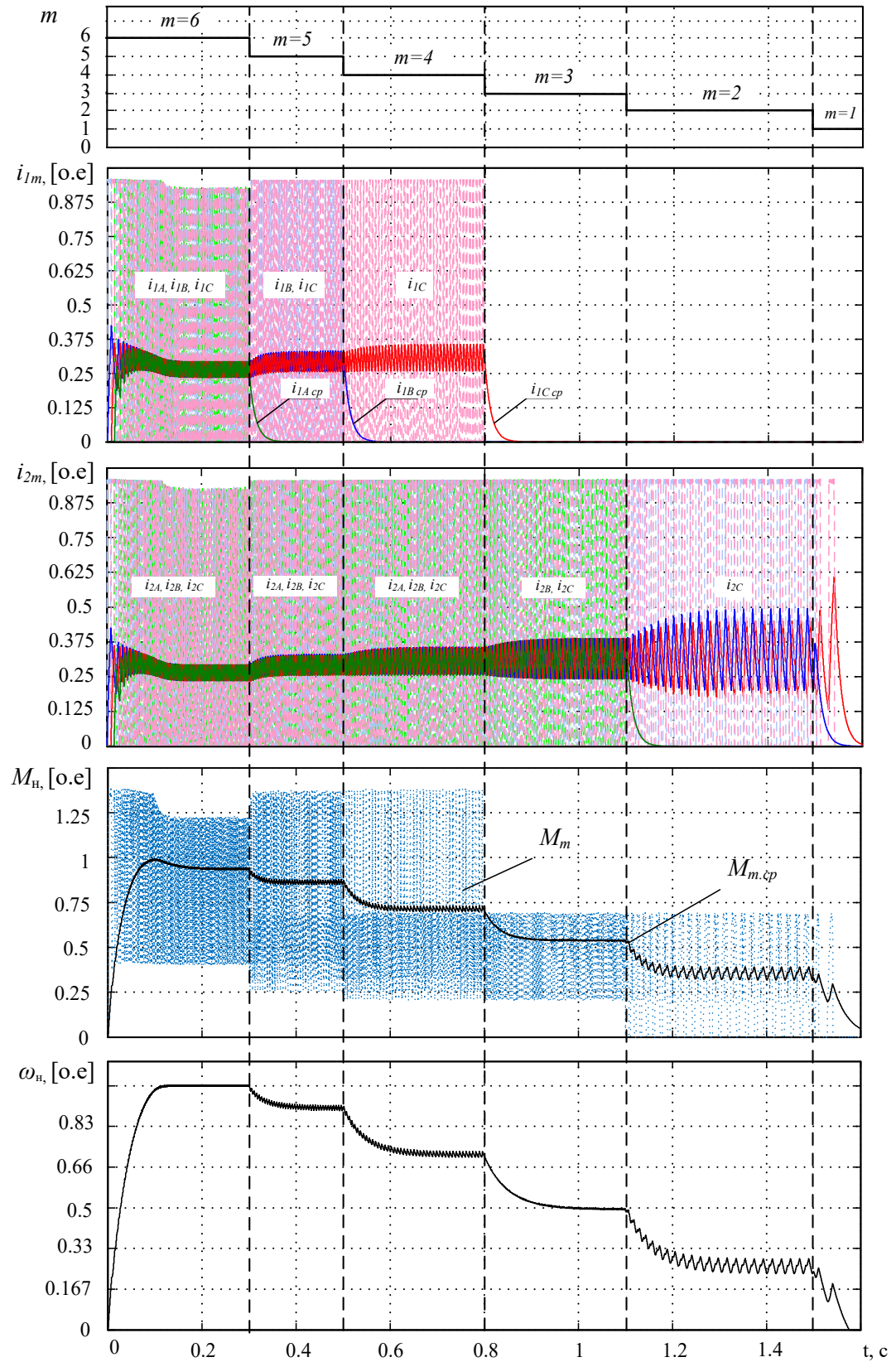


Рисунок 3.8. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода без запуска алгоритма отказоустойчивого управления.

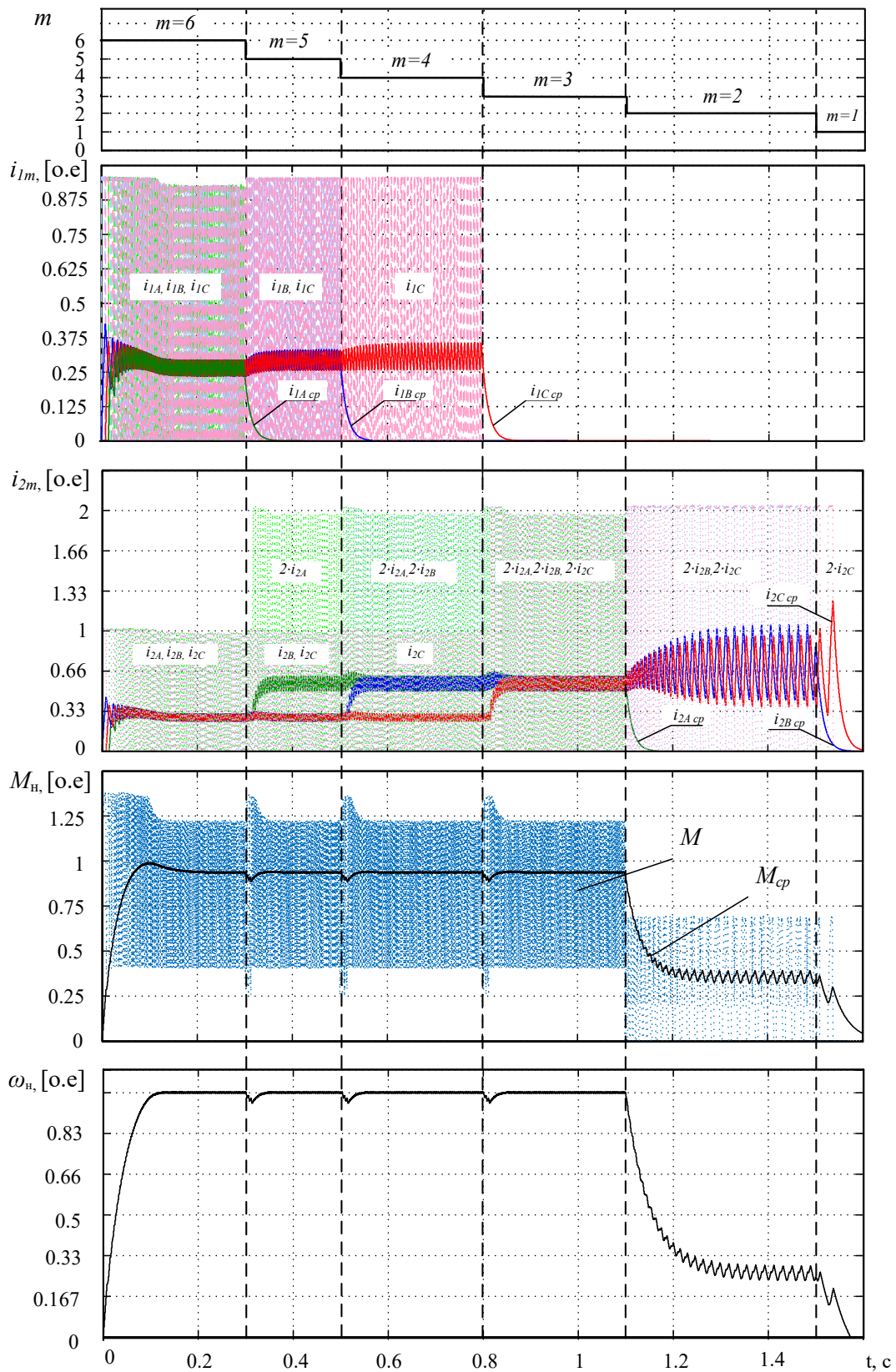


Рисунок 3.9. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода с запуском алгоритма отказоустойчивого управления.

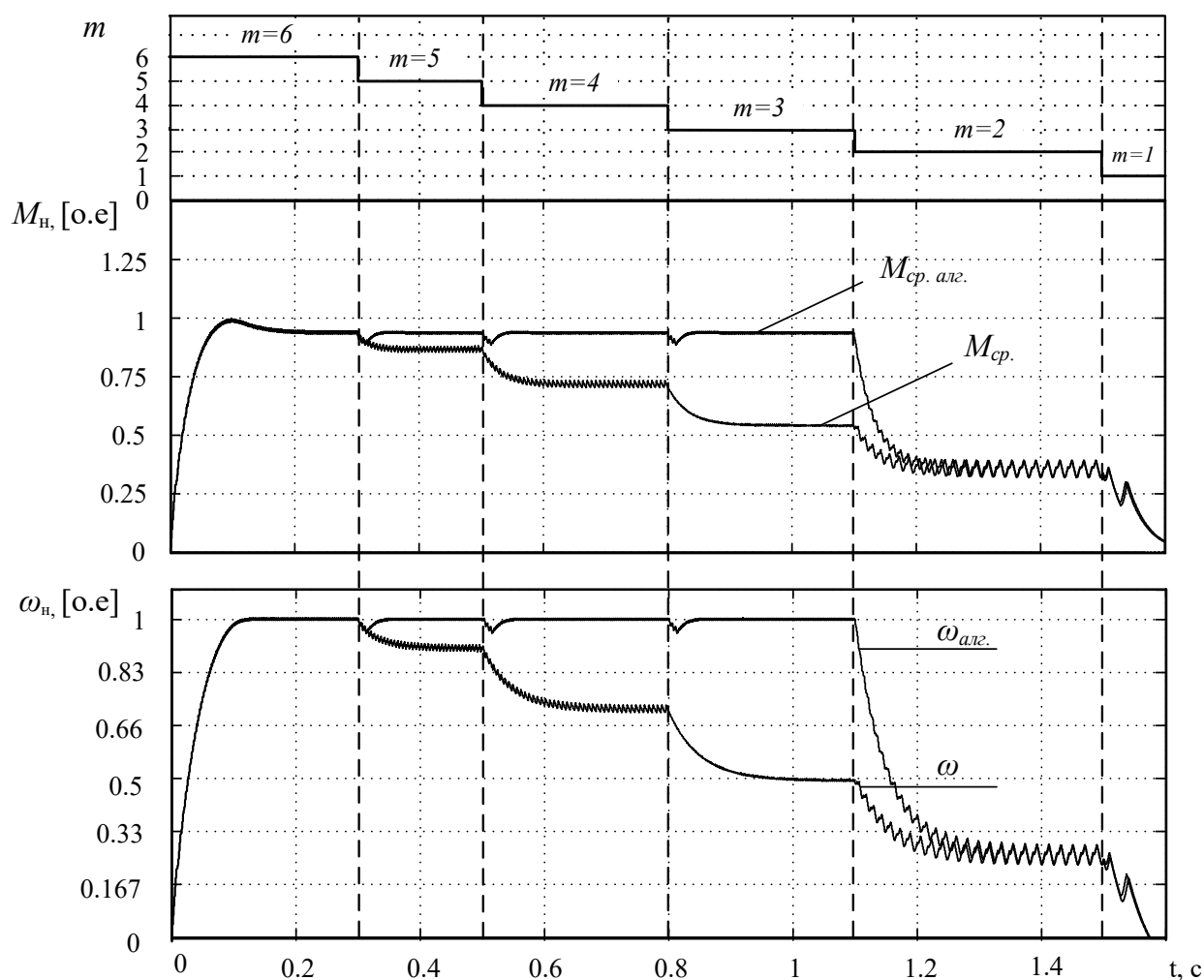


Рисунок 3.10. Временная диаграмма постепенного истощения ресурса трехфазного вентильно-индукторного электропривода, обобщенная без запуска алгоритма и с запуском алгоритма отказоустойчивого управления.

На рис. 3.8. приведены временные диаграммы переходных процессов в двухсекционном трехфазном ВИП в процессе истощения рабочего ресурса при последовательных множественных отказах. На первой диаграмме (верхняя) показано число одновременно работающих фаз двигателя $m = 6...1$ в процессе истощения рабочего ресурса двигателя. На второй диаграмме i_{1m} (в о.е.) показаны суммарные диаграммы фазных токов первой секции i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} и их средние значения $i_{1Acp}, i_{1Bcp}, i_{1Ccp}$. На третьей диаграмме i_{2m} (в о.е.) показаны суммарные диаграммы фазных токов второй секции i_{2A}, i_{2B}, i_{2C} и их средние значения $i_{2Acp}, i_{2Bcp}, i_{2Ccp}$. На четвертой диаграмме M_H (в о.е.) показаны суммарные диаграммы мгновенных моментов фаз в функции числа

одновременно работающих фаз двигателя $m = 6...1$ в процессе истощения рабочего ресурса двигателя и его средние значения $M_{m\text{ ср}}$. На пятой диаграмме ω_H (в о.е. от номинального значения) показана частота вращения двигателя. При $m = 6$ все фазы работоспособны, при $m = 5$ $i_{1A} = 0$, при $m = 4$ $i_{1B} = 0$, при $m = 3$ $i_{1C} = 0$, при $m = 2$ $i_{2A} = 0$ и двигатель работает в двухфазном режиме.

На рис. 3.9 приведены временные диаграммы переходных процессов в двухсекционном трехфазном ВИП в процессе истощения рабочего ресурса при последовательных множественных отказах без применения алгоритма отказоустойчивого управления и с ним. На первой диаграмме (верхняя) показано число одновременно работающих фаз двигателя $m = 6...1$ в процессе истощения рабочего ресурса двигателя. На второй диаграмме M_H (в о.е.) показаны суммарные диаграммы средних значений мгновенных моментов фаз $M_{\text{ср}}$ в функции числа одновременно работающих фаз двигателя $m = 6...1$ в процессе истощения рабочего ресурса двигателя. А так же суммарные диаграммы средних значений мгновенных моментов фаз при работе с алгоритмом отказоустойчивого управления $M_{\text{ср. алг.}}$. На третьей диаграмме ω_H (в о.е. от номинального значения) показана частота вращения двигателя. В обычном режиме работы ω при $m = 6$ все фазы работоспособны, при $m = 5$ $M_{A1} = 0$, при $m = 4$ $M_{B1} = 0$, при $m = 3$ $M_{C1} = 0$, при $m = 2$ $M_{A2} = 0$ и двигатель работает в двухфазном режиме. При работе с алгоритмом $\omega_{\text{алг.}}$ даже при поочередных отказах фаз происходит полное восстановление работоспособности вплоть до работы в двухфазном режиме.

Показаны возможность и процесс плавного истощения рабочего ресурса двухсекционного трехфазного вентильно-индукторного электропривода ($m = 6$) с обеспечением свойства живучести при одиночных и множественных отказах вплоть до работы на двух разноименных оставшихся фазах ($m = 2$) в одной или двух секциях двигателя [22, 26, 32].. Из диаграмм видно, что при работе на двух фазах в ЭП ухудшается качество регулирования, величина пульсаций частоты вращения достигает 23%. Однако живучесть электропривода обеспечивается при работе на двух разноименных оставшихся фазах в одной или двух секциях

двигателя с моментом и частотой вращения на уровне не менее 30% от номинальных. При отключении пятой фазы, в однофазном режиме ($m = 1$) двигатель становится неработоспособен и останавливается.

На рисунок 3.11 приведен 3-х мерный график зависимости $\Delta\omega$ от величины нагрузки M_c в относительных единицах относительно величины номинальной нагрузки и времени переключения структуры электропривода $T_{\text{эп}}$.

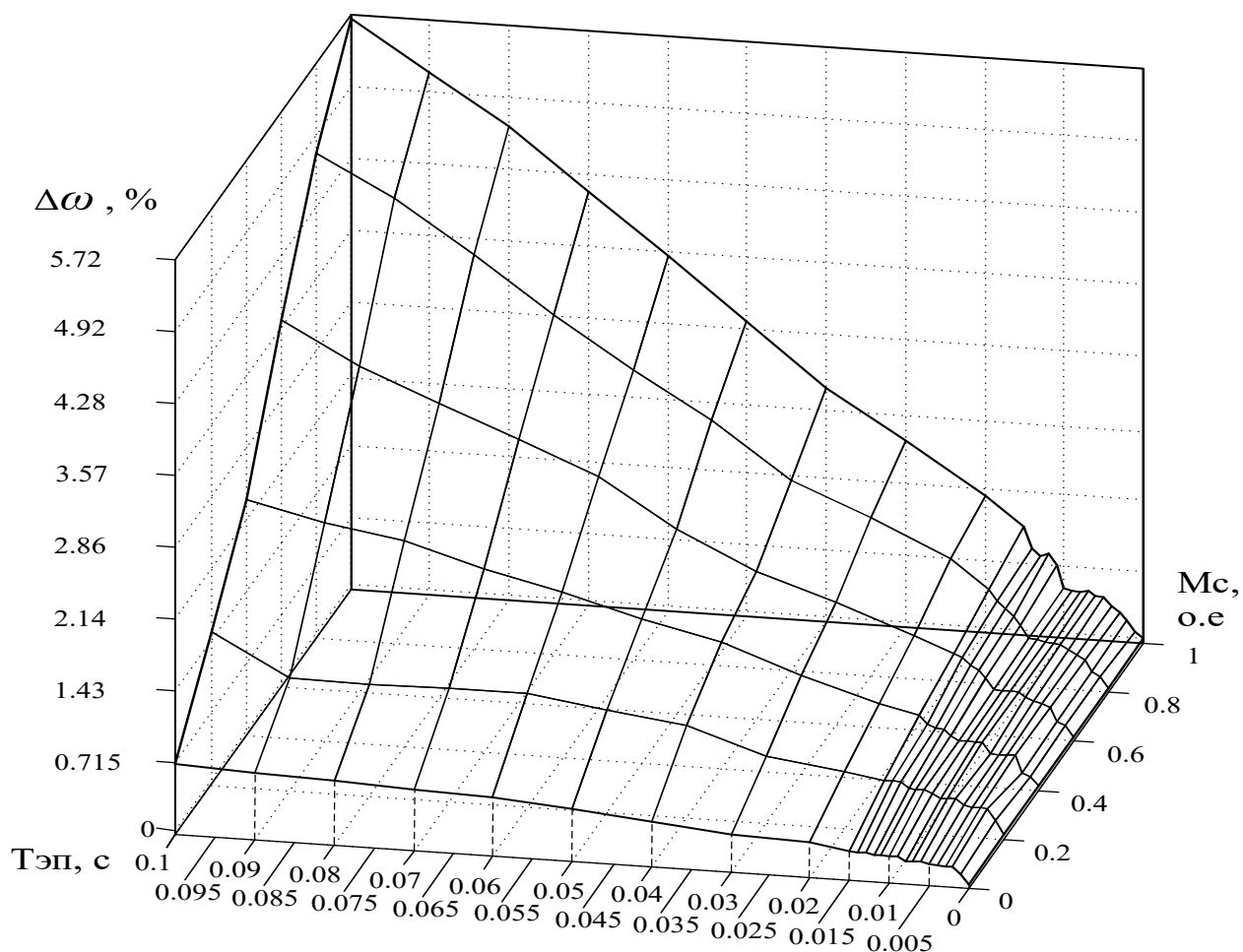


Рисунок 3.11. График зависимости $\Delta\omega$ от величины нагрузки M_c и времени переключения структуры электропривода $T_{\text{эп}}$ в двухсекционном вентильно-индукторном электроприводе.

Как следует из рисунка 3.11 максимальное значение провала частоты вращения, а именно 5.72% возникнет при полной номинальной нагрузке при времени переключения структуры электропривода 0.1 с, что во много раз превышает частоту дискретизации ШИМ. Следовательно, если обеспечивать

диагностику со временем, соответствующим дискретизации ШИМ, то можно добиться восстановления работоспособности электропривода с потерями в частоте вращения менее 1%. Тем самым можно сказать, что использование алгоритма отказоустойчивого управления на основе анализа фазных токов позволяет полностью восстанавливать работоспособность электропривода с минимальными потерями частоты вращения.

3.3. Оценка остаточного рабочего ресурса.

При этом возможен расчёт коэффициента работоспособности, позволяющего оценивать для ВИП остаточный рабочий ресурс вплоть до полной потери работоспособности. Оценивается ущерб от одиночных или множественных отказов с помощью коэффициента работоспособности k :

$$k = \frac{s \cdot p}{n \cdot m} \quad (3.4)$$

где n – число m – фазных секций, p – коэффициент уровня остаточного момента ЭПТ (в относительных единицах), s – коэффициент избыточности ЭПТ:

$$s = n \cdot m - w \quad (3.5)$$

где w – число отказов ЭПТ,

$$p = \frac{k_d}{6} \quad (3.6)$$

Где k_d коэффициент, составляемый из индексов, входящих в состав алгоритма:

$$k_r = \bar{a} \cdot (1 + \bar{d}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{d}}} + \bar{d} \cdot (1 + \bar{a}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{a}}} + \bar{b} \cdot (1 + \bar{e}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{e}}} + \bar{e} \cdot (1 + \bar{b}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{b}}} + \bar{c} \cdot (1 + \bar{f}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{f}}} + \bar{f} \cdot (1 + \bar{c}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{c}}} ;$$

В случае неполного исчерпания остаточного ресурса преобразователя частоты и двигателя при выполнении условия $k \geq 2$ запускается процесс полного или частичного восстановления работоспособности ЭПТ, для структурной адаптации электропривода к воздействию электрических повреждений на основе сформированной необходимой основной избыточности электропривода на

основе функционального или (и) структурного резервирования по силовым цепям преобразователя частоты и дополнительная избыточность нагрузочного резерва по мощности силовых цепей преобразователя частоты, информационного (процессорного) резерва управления и временного резерва в виде учета инерции маховых масс двигателя во время переключения структуры ЭПТ при вводе в работу резерва ЭПТ. Результаты расчетов коэффициентов приведены в таблице 3.1.

Коэффициент работоспособности системы электропривода позволяет оценить текущее состояние ВИП и рассчитать остаточный ресурс ВИП работы после одного или нескольких отказов.

3.4. Алгоритмы отказоустойчивого управления в ЭЦН с ВИД

В настоящее время нефтедобыча занимает значительный экономический кластер энергетического сектора Российской Федерации. При этом эффективность разработки нефтегазовых месторождений в значительной степени определяется непрерывной диагностикой и оптимизацией эксплуатационных режимов системы «скважина – погружной насос» [4, 47]. Аварийный выход из строя погружного электродвигателя (ЭД) в составе установки электроцентробежного насоса (ЭЦН) влечет за собой значительные экономические потери для нефтедобывающей организации.

С целью предотвращения аварийных отключений ЭЦН предлагаются технические решения, которые позволяют продолжить работу насоса после однократных или множественных отказов силовой части статорных обмоток исполнительного двигателя [2,3,8,17]. Существует ряд исследований, предлагающих внедрение вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) в качестве исполнительного двигателя насосного агрегата. Имеющиеся разработки преимущественно касаются конструктивных особенностей ВИД и его модернизации [46-49]. Однако, на сегодняшний день ВИД не получил должного развития и серийного производства. Вентильно-индукторный электродвигатель обладает рядом преимуществ по сравнению с асинхронными

и вентильными двигателями [32, 77-79]. К достоинствам ВИД относятся: надежность и простота конструкции и технологии изготовления; возможность получать как сверхвысокие, так и сверхнизкие частоты вращения вала; гибкость системы управления; ротор ВИД имеет малый момент инерции, что позитивно отражается на динамике его работы; ВИД способен работать в тяжелых перегрузочных режимах и в широком диапазоне нагрузок; за счет электрически независимых фаз ВИД обладает исходной отказоустойчивостью; ВИД обладает высокими энергетическими характеристиками и КПД [4]. Следует отметить, что преимущества ВИД в полной мере приведены в работах [14-29].

Управление ВИД в рабочих режимах отличается от управления в аварийных режимах работы, так как обрыв фазы двигателя вызывает защитное отключение системы электропривода [32]. Соответственно для управления электроприводом в аварийных и неполнофазных режимах работы необходимо разработать алгоритмы мониторинга и управления, отладку которых целесообразно проводить на основе моделирования [23, 27-29].

На начальном этапе исследований был определен перечень объектов нефтяных скважин, моделирование которых является необходимым с точки зрения синтеза и разработки алгоритмов управления [4, 47]. Установка электроцентробежного насоса представляет собой электротехнический комплекс, состоящий из системы алгоритмического управления (СУ), погружного вентильно-индукторного электродвигателя, центробежного насоса (ЦН), блока обработки телеметрических данных (ТС). В связи с этим предложенная модель построена объединением моделей ПЭД, ЦН, СУ с моделью учитывающей потери напряжения в кабельной линии (КЛ). При этом модели движения жидкости не рассматривались, учитывалось только влияние среды на формирование момента нагрузки ПЭД [120, 122, 127].

Основные принципы построения модели вентильно-индукторного электродвигателя в среде имитационного моделирования MatLab Simulink рассмотрены в ряде работ [1-3, 22-29].

Строение блоков «возмущающее воздействие M_c » и «ЭЦН с ВИД» приведены на рисунке 3.12.

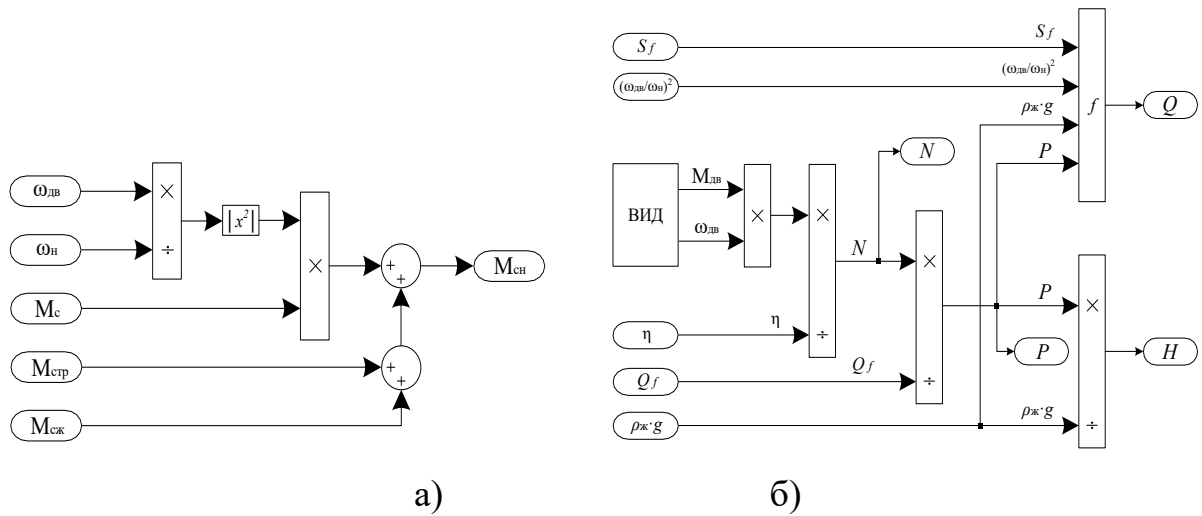


Рис. 3.12. а) Блок «возмущающее воздействие M_c », б) блок «электроцентробежный насос с вентильно-индукторным двигателем»

Описание устройства блоков преобразователя частоты (ПЧ), кабельной линии (КЛ), датчика положения (ДП) и блока регуляторов подробно рассмотрены в ранее опубликованных работах [4, 22-26].

Рассмотрим напорно-расходные характеристики погружного ЭЦН с вентильно-индукторным электродвигателем. На рисунке 4а приведена напорно-расходная характеристика для работы без алгоритмов: (строка 0 таблицы 1), на рисунке 4б напорно-расходная характеристика при работе с применением алгоритма компенсации токов фаз (строка 1 таблицы 1). Как следует из рисунка 4б при применении алгоритма компенсации фазных токов возможно полное восстановление работоспособности на двух фазах.

На рисунке 5 представлены расходные характеристики потока жидкости для алгоритмов (0)-(3) из таблицы 1 при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя. Численные значения установившегося уровня потока нефти при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Значения потока жидкости при последовательном отключении фаз.

Q для алгоритмов (0)-(3), в о.е относительно Q_H	3 фазы	2 фазы	1 фаза
(0)	1	0,66	0,33
(1)	1	1	0,66
(2)	1	0,9	0,59
(3)	1	0,94	0,74

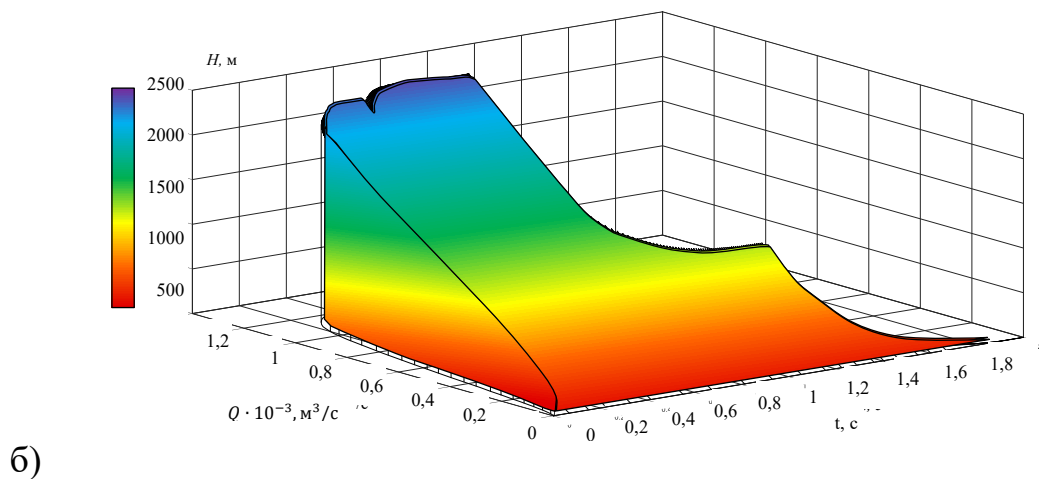
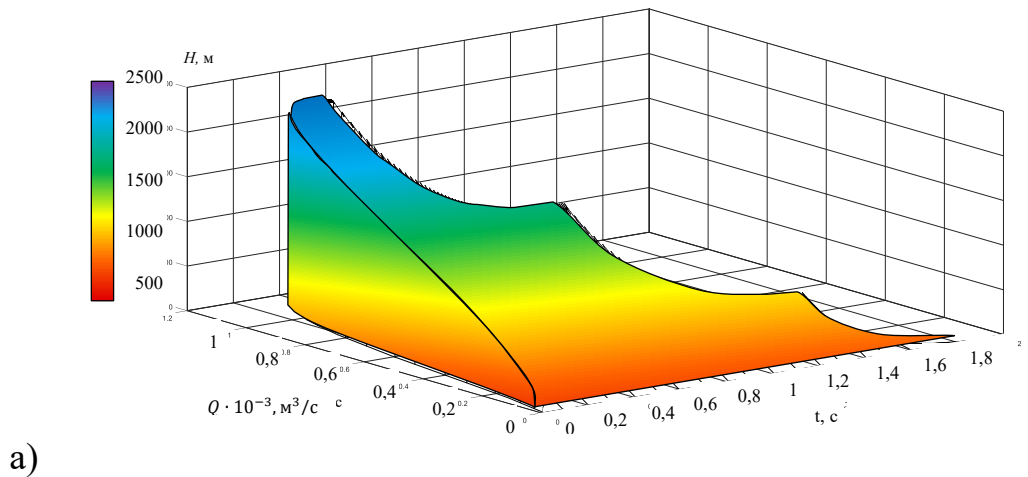


Рис. 3.13. а) напорно-расходная характеристика для работы без алгоритмов б)
напорно-расходная характеристика при работе с применением алгоритма
компенсации момента за счет увеличения амплитуд токов фаз.

Из анализа таблицы 3.2 следует, что при использовании исходной отказоустойчивости алгоритм (0) при неисправности в одной фазе электродвигателя, установившееся значение потока жидкости составляет 66% от номинального уровня, при обрыве двух фаз электродвигателя 33%

соответственно. При этом показано, что двигатель может продолжать функционировать на одной оставшейся в работе фазе электродвигателя, что делает его уникальным по отношению к имеющимся в эксплуатации погружным насосным агрегатам, построенным на основе асинхронного и вентильного двигателей [46-49].

На рис. 5 приведены характеристики объемного расхода жидкости при изменении напора $Q(H)$ и характеристики степенной зависимости момента от скорости с учетом времени, где x – степень зависимости (для кривых 1,4 $x=4$, для кривых 2,5 $x=3$, для кривых 3,6 $x=2$), при работе с применением алгоритма компенсации токов фаз. Из рисунка следует, что чем выше степенная зависимость, тем эффективнее алгоритм, то есть чем выше напор на магистрали, тем эффективнее восстановление производительности при активации алгоритма отказоустойчивого управления.

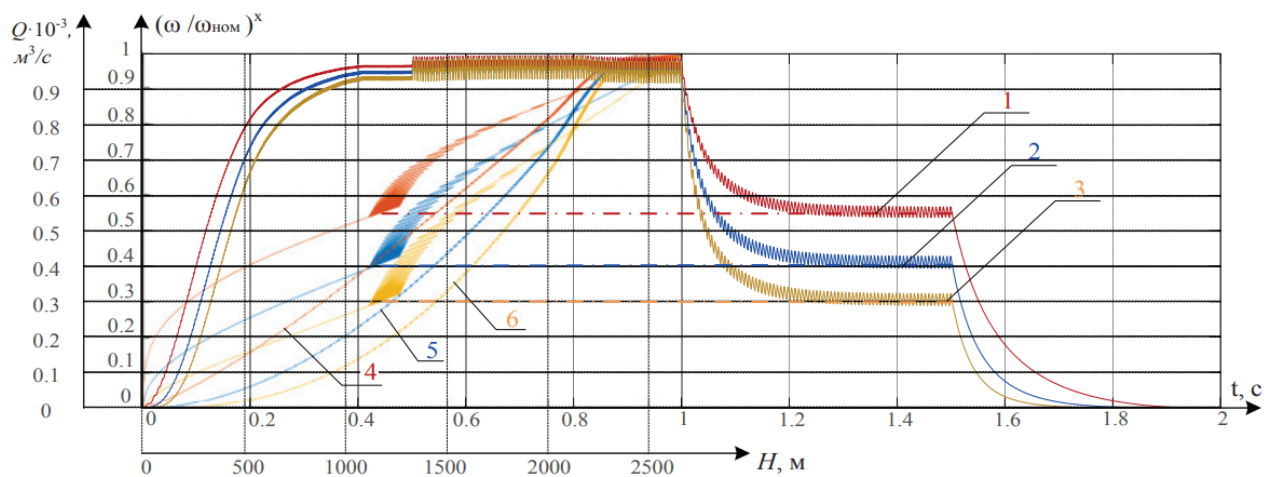


Рис. 3.14. Характеристики $Q(H)$ и характеристики степенной зависимости момента от скорости с учетом времени.

На рис. 3.15 представлены расходные характеристики объемного расхода жидкости для алгоритмов 0–3 из табл. 3.2 при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя. Численные значения установившегося уровня Q при последовательном аварийном отключении фаз электродвигателя.

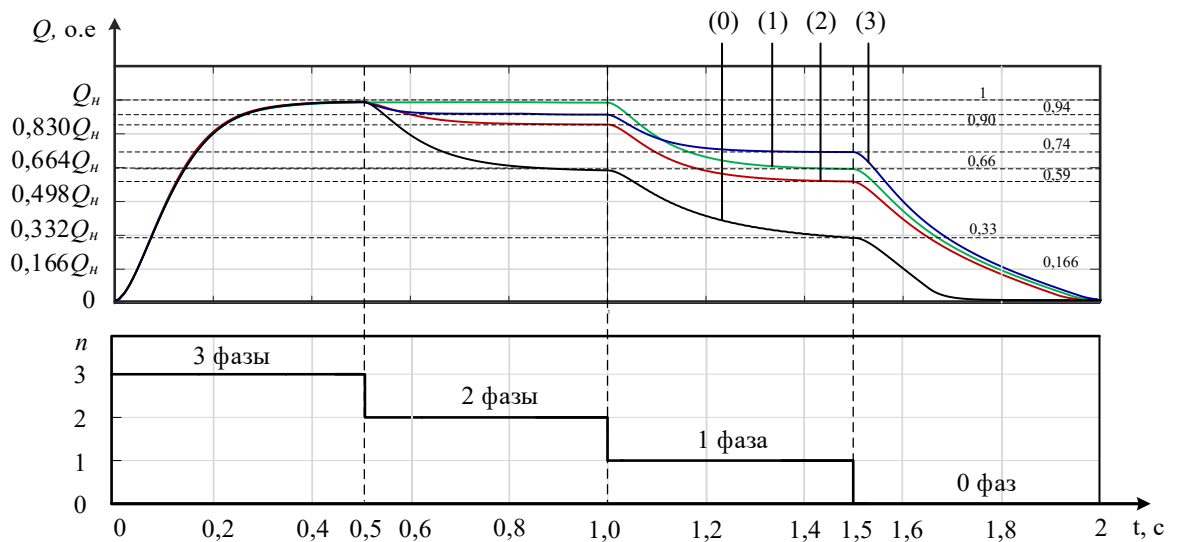


Рис. 3.15. Расходные характеристики потока жидкости для алгоритмов (0)-(3) таблицы 3.2

При работе с алгоритмом компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов (1) при неисправности одной фазы электродвигателя, возможно полное восстановление работоспособности без снижения заданного уровня потока жидкости. Данный алгоритм целесообразно применять, если требуемый уровень потока жидкости меньше номинального для электродвигателя, чтобы обеспечить долговременную эксплуатацию насоса при отказе электродвигателя типа обрыв фазы без риска перегрева обмоток электродвигателя. При неисправности типа обрыв двух фаз этот алгоритм (1) показал значение установившегося уровня потока жидкости 66%.

При работе с алгоритмом (2) с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз установившиеся значения составили при неисправности типа обрыв фазы электродвигателя 90% и при обрыве двух фаз электродвигателя 59% соответственно. Алгоритм (2) позволяет без каких-либо конструктивных изменений и риска перегрева повысить отказоустойчивость исполнительного электродвигателя, однако при этом возрастает потребление мощности от источника питания [17-22].

При работе комбинированного алгоритма (3) с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов в 1,5 раза при неисправности типа обрыв первой фазы установившееся значение

потока жидкости составило 94%, а при неисправности типа обрыв второй фазы - 74%.

3.5. Алгоритмы отказоустойчивого управления в транспортном средстве

Важным преимуществом ВИД является то, что он обладает тяговой механической характеристикой, характеристикой постоянной мощности. Благодаря тому, что ВИД в модели ТС является тяговым, целесообразно рассмотреть работу в аварийных режимах при совмещенном алгоритме отказоустойчивого управления (3.3). На рисунке 3.16 показана блок-схема алгоритма отказоустойчивого управления ТС с ВИД (рис. 3.16 а) и функциональная схема ТС с ВИД (рис.3.16 б).

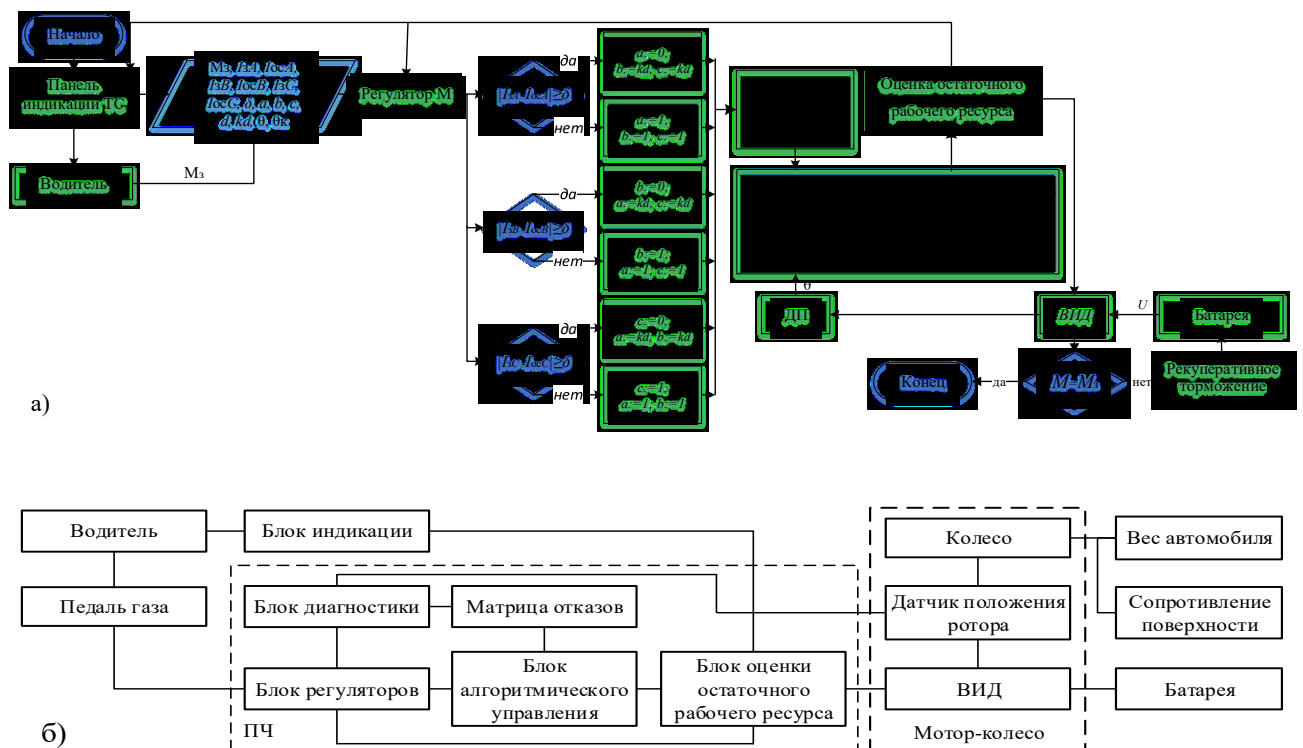


Рис.3.16. а) блок схема совмещенного алгоритма в ТС с ВИД б) функциональная схема рассматриваемого ТС с ВИД.

Моделирование производится при допущении, что задание на момент не изменяется и равно 110 Н. Произведем запуск модели при 3-х фазах, затем на 20-й секунде произведем обрыв 1й фазы и на 40-й секунде обрыв 2-й фазы

сначала получим характеристики при полной массе электромобиля (рисунки 3.17-3.22).

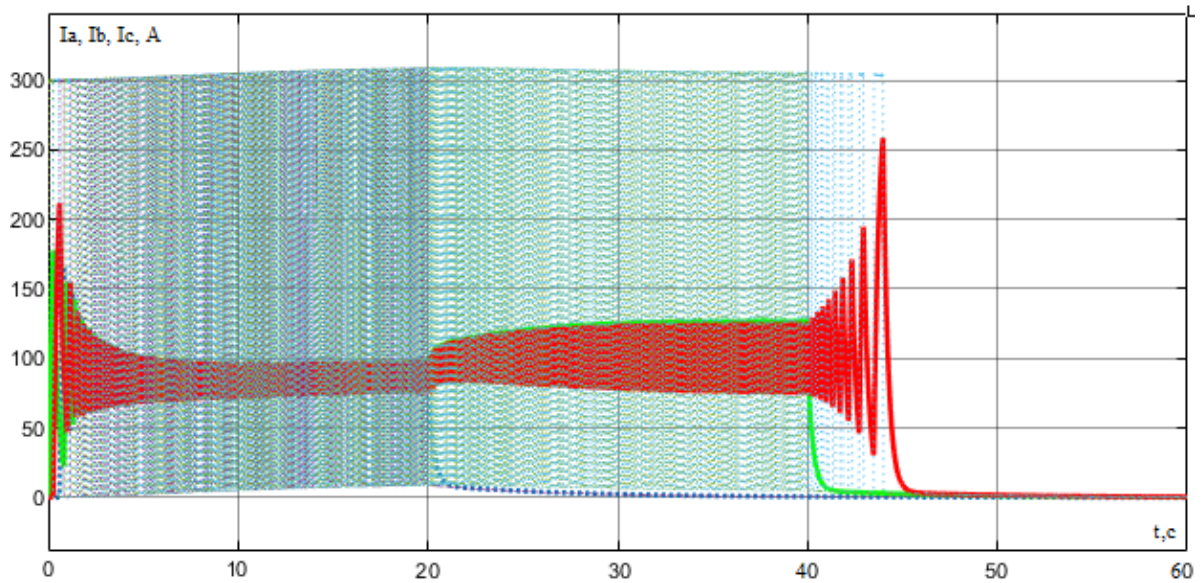


Рисунок 3.17. Осциллограммы токов ВИН при полной массе электромобиля

По полученным осциллограммам видно, что происходит увеличение токов 2-х оставшихся в работе фазах на 20-й секунде. Хотя и токи имеют пульсирующий характер, мы имеем установившийся процесс работы ВИН на 2-х фазах. Однако после обрыва 2-й фазы, на 40-й секунде, ток оставшейся в работе фазы ВИН носит расходящийся характер, что говорит о том, что ВИН уже не способен поддерживать заданный режим. Происходит остановка двигателя.

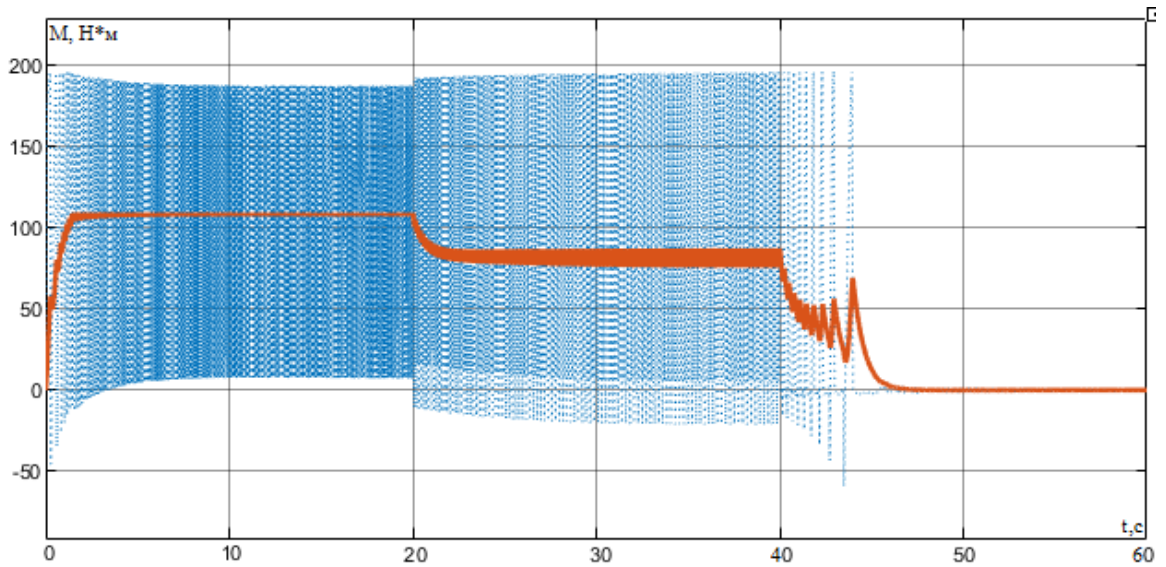


Рисунок 3.18. Осциллограммы момента M , который развивает двигатель при полной массе электромобиля

В течении нескольких секунд двигатель развивает заданный момент 110 Н. При обрыве 1-ой фазы момент снижается до 90 Н, затем падает до 0, при обрыве 2-й фазы.

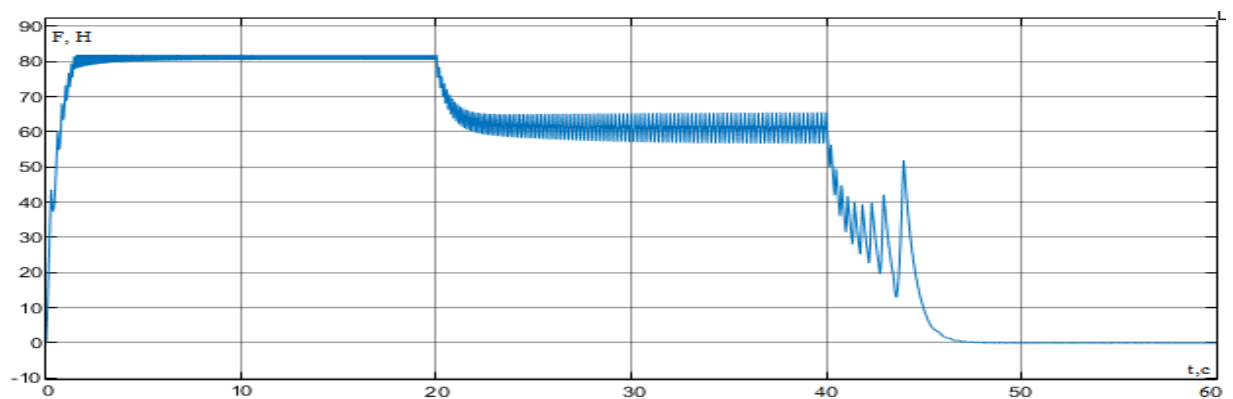


Рисунок 3.19. Осциллограмма усилия на валу электродвигателя при полной массе электромобиля

Осциллограмма усилия на валу повторяет форму момента, с учетом диаметра колеса

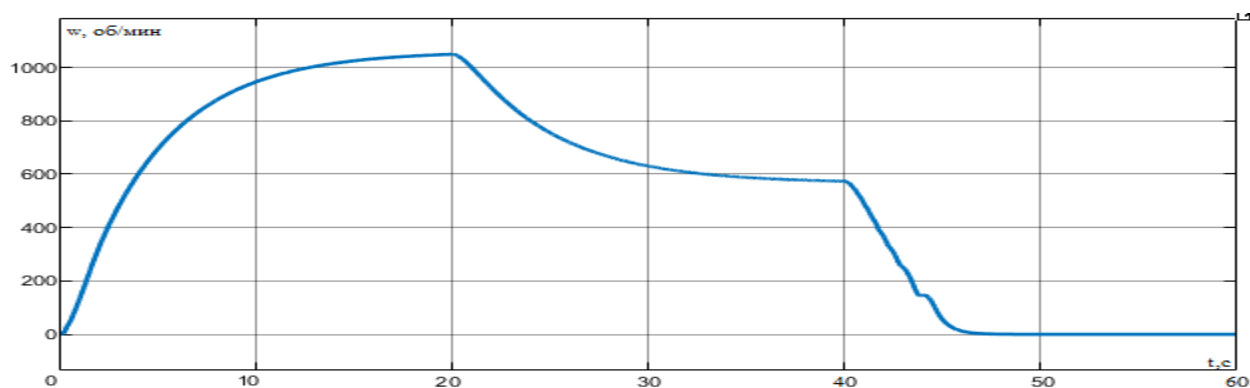


Рисунок 3.20 – Скорость вращения вала двигателя при полной массе
электромобиля

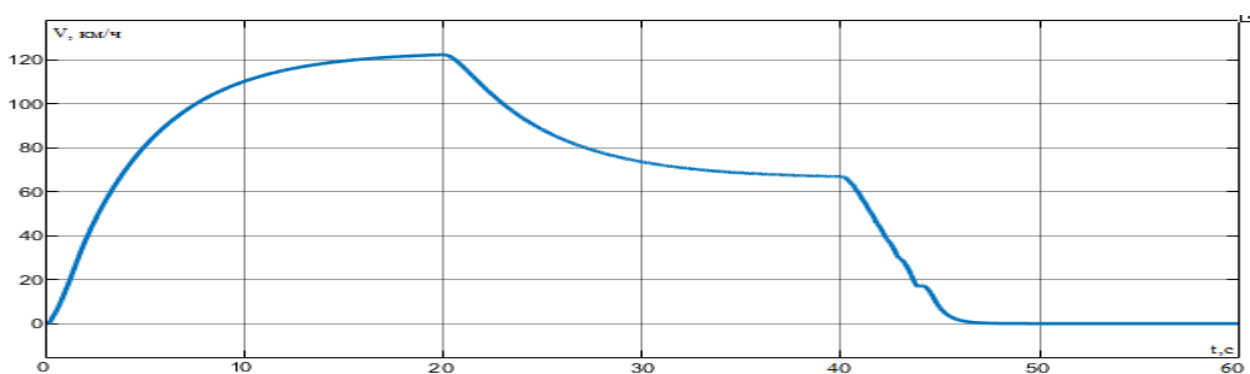


Рисунок 3.21 – Скорость движения при полной массе электромобиля

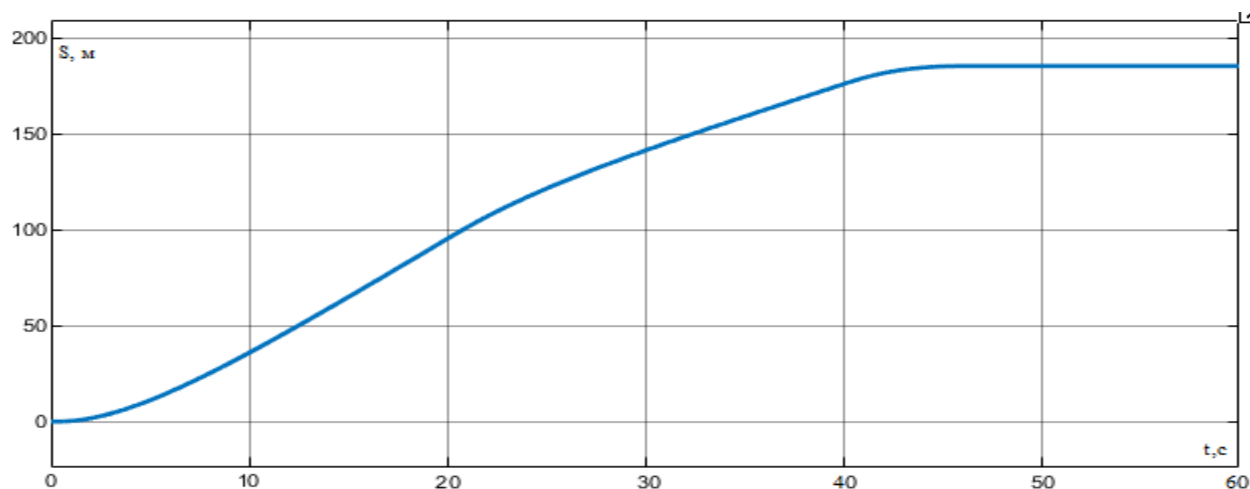


Рисунок 3.22 – Перемещение при полной массе электромобиля

Выводы по остальным характеристикам приведены ниже. Произведем те же действия для снаряженной массы электромобиля 1100 кг (рисунки 3.23-2.28).

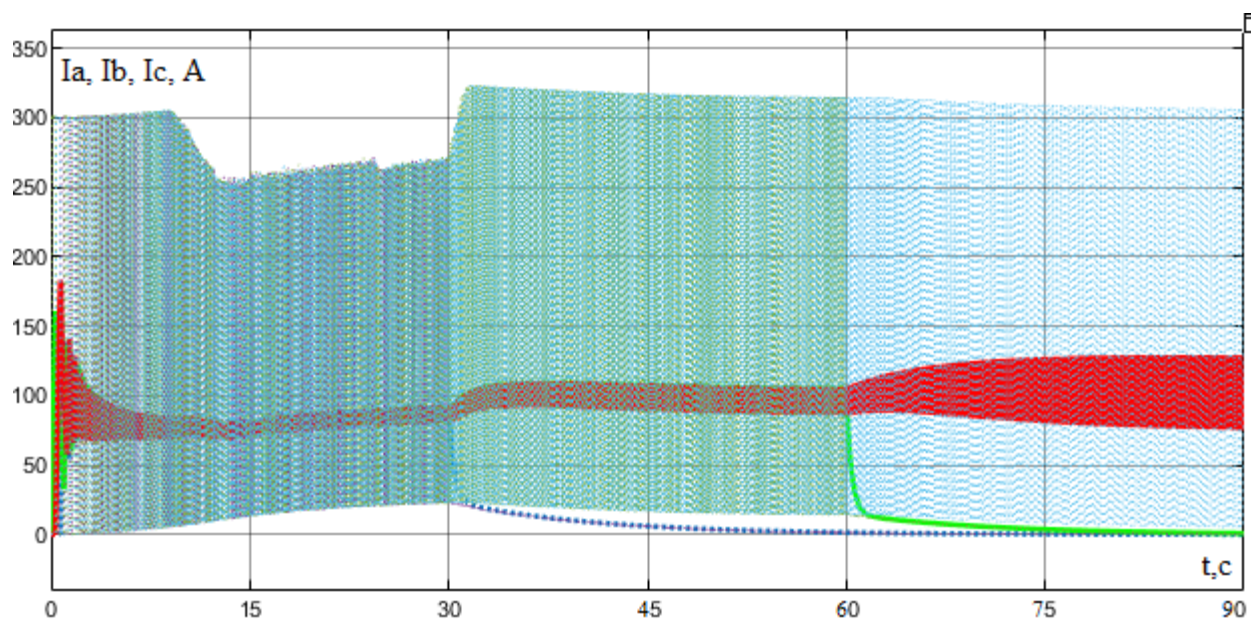


Рисунок 3.23 – Осциллограмма токов ВИД при снаряженной массе электромобиля

В отличие от результатов моделирование при полной массе 1600 кг, в данном случае падение тока оставшейся в работе фазы, не происходит, он имеет установившийся характер, это говорит о том, что ВИП способен работать при 1-й фазе.

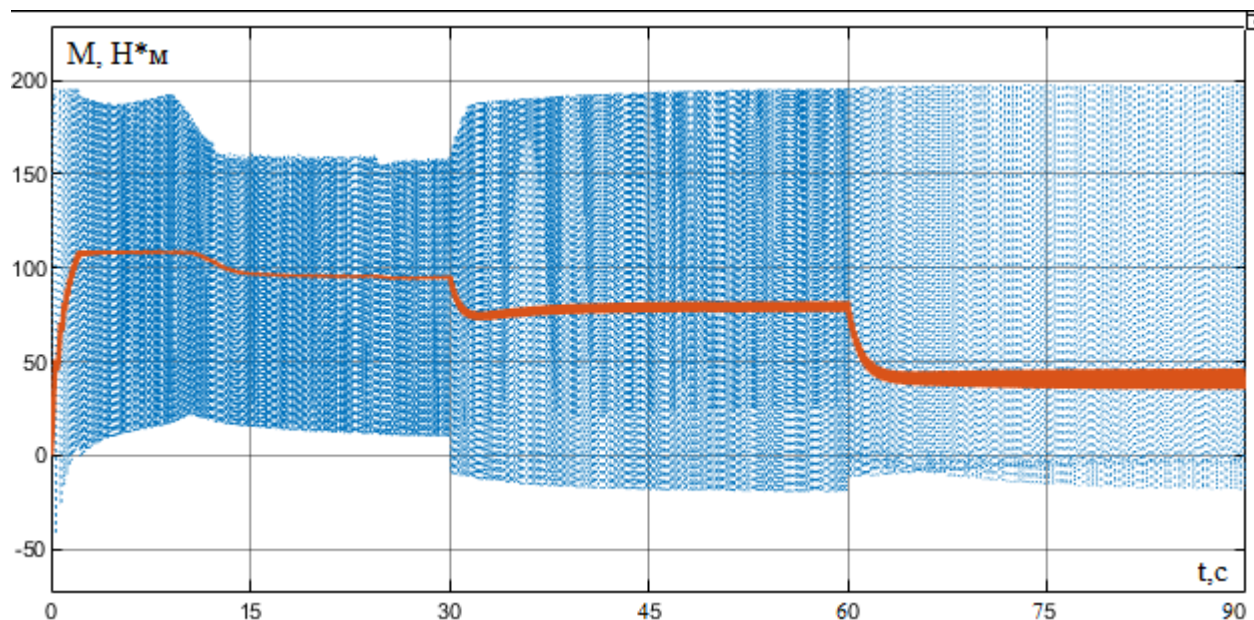


Рисунок 3.24. Осциллограммы момента M , который развивает двигатель при снаряженной массе электромобиля

Из осциллограммы момента, можно сделать вывод, что при 1-й фазе рабочей фазе, ВИД способен развивать момент в 45 Н, при заданном значении 110 Н.

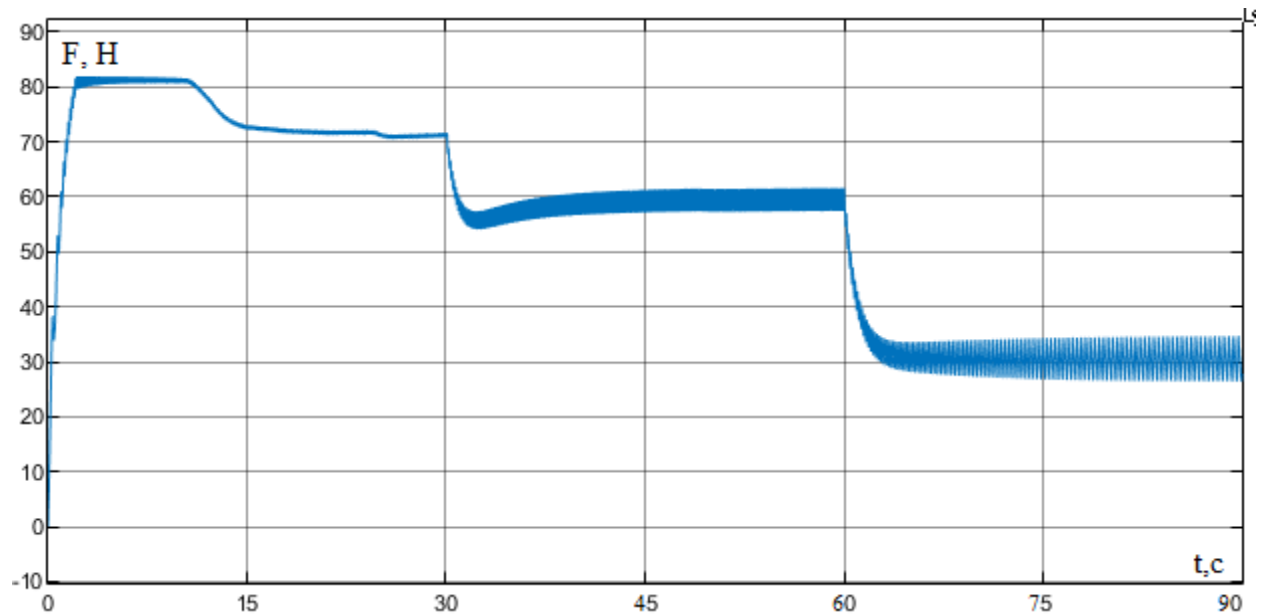


Рисунок 3.25 – осциллограмма усилия на валу электродвигателя при снаряженной массе электромобиля

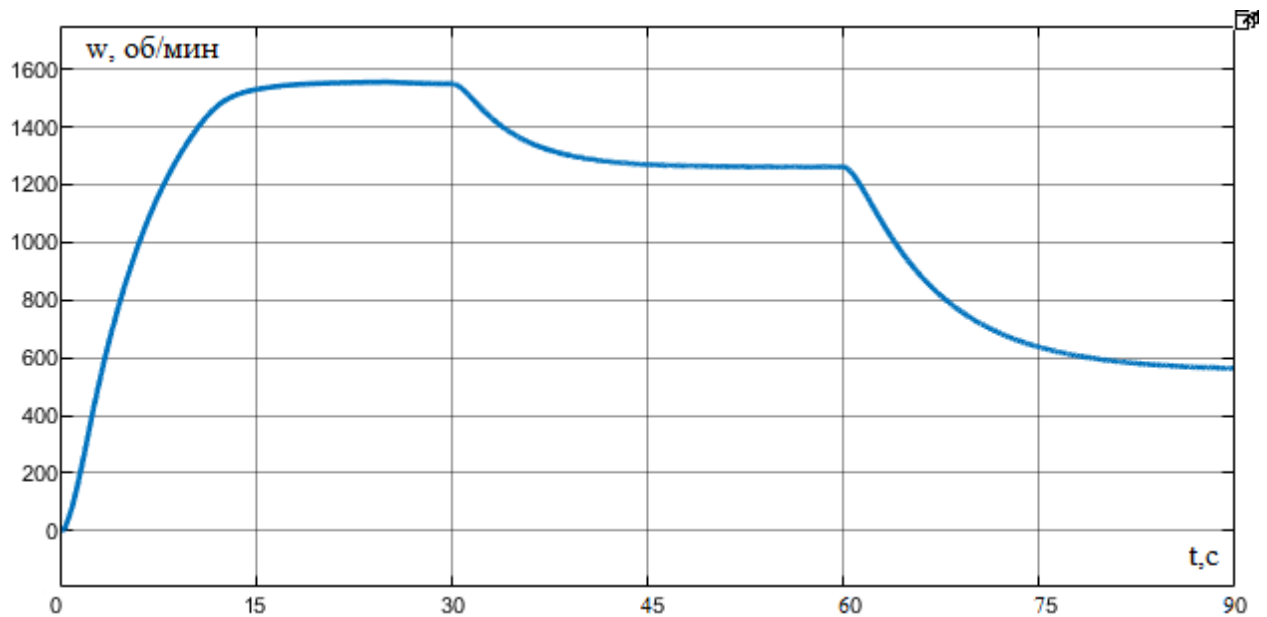


Рисунок 3.26 – Скорость вращения вала двигателя при снаряженной массе электромобиля

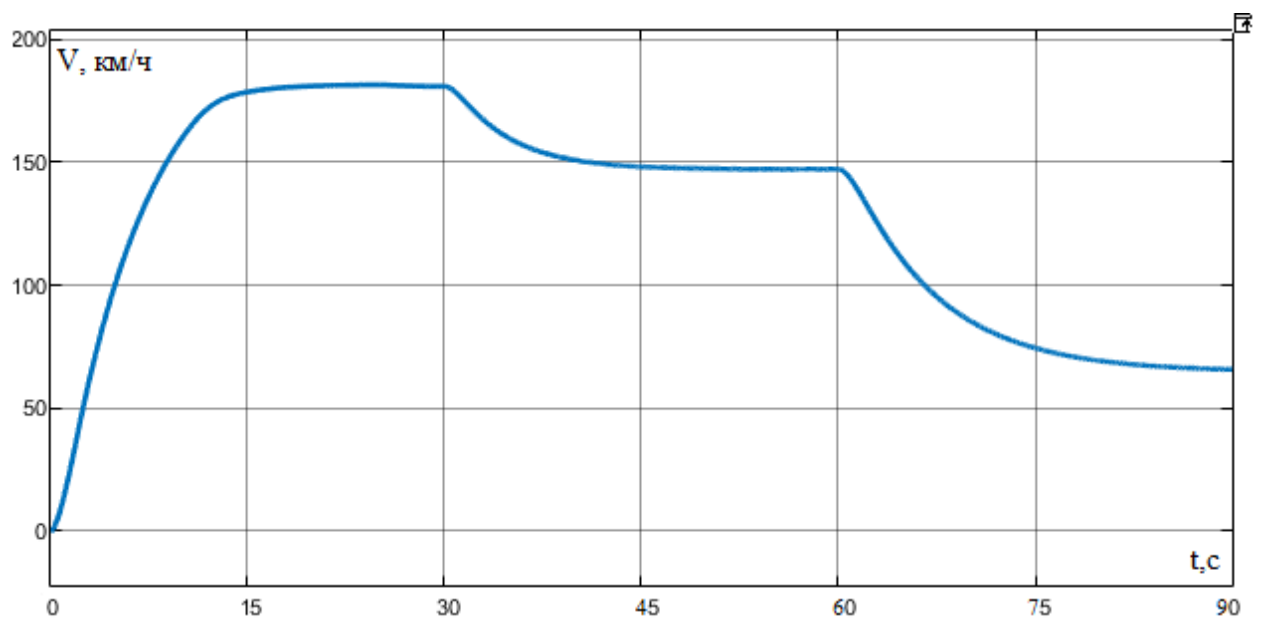


Рисунок 3.27 – Скорость движения при снаряженной массе электромобиля

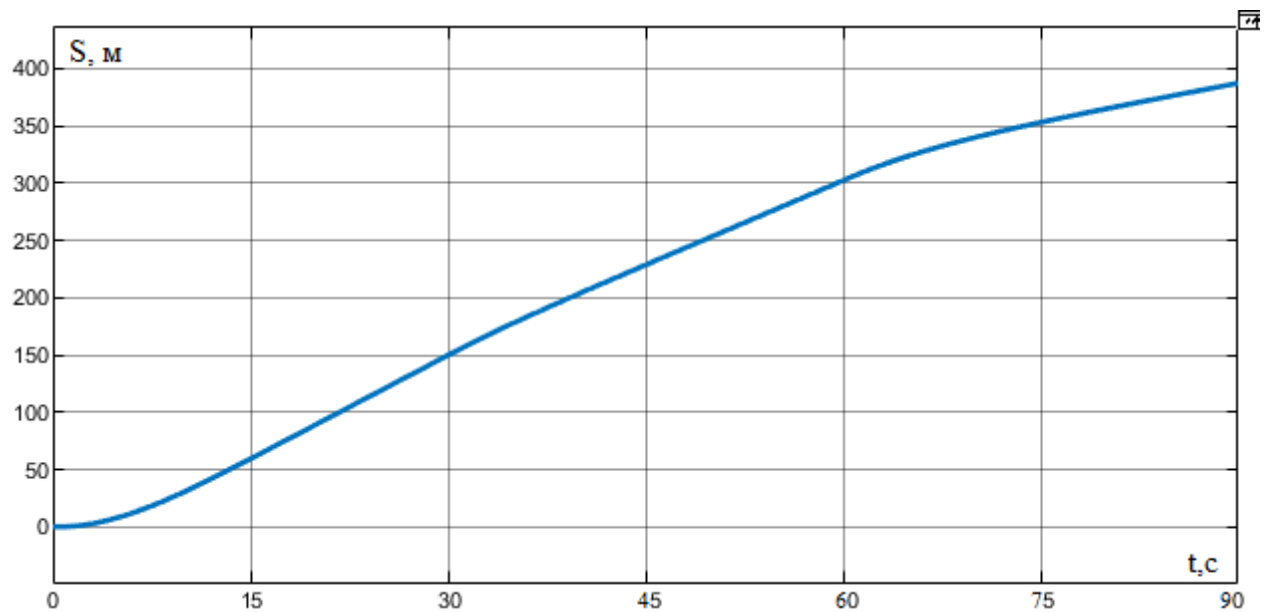


Рисунок 3.28 – Перемещение при снаряженной массе электромобиля

Произведем моделирование пуска электромобиля при 2-х рабочих фазах.

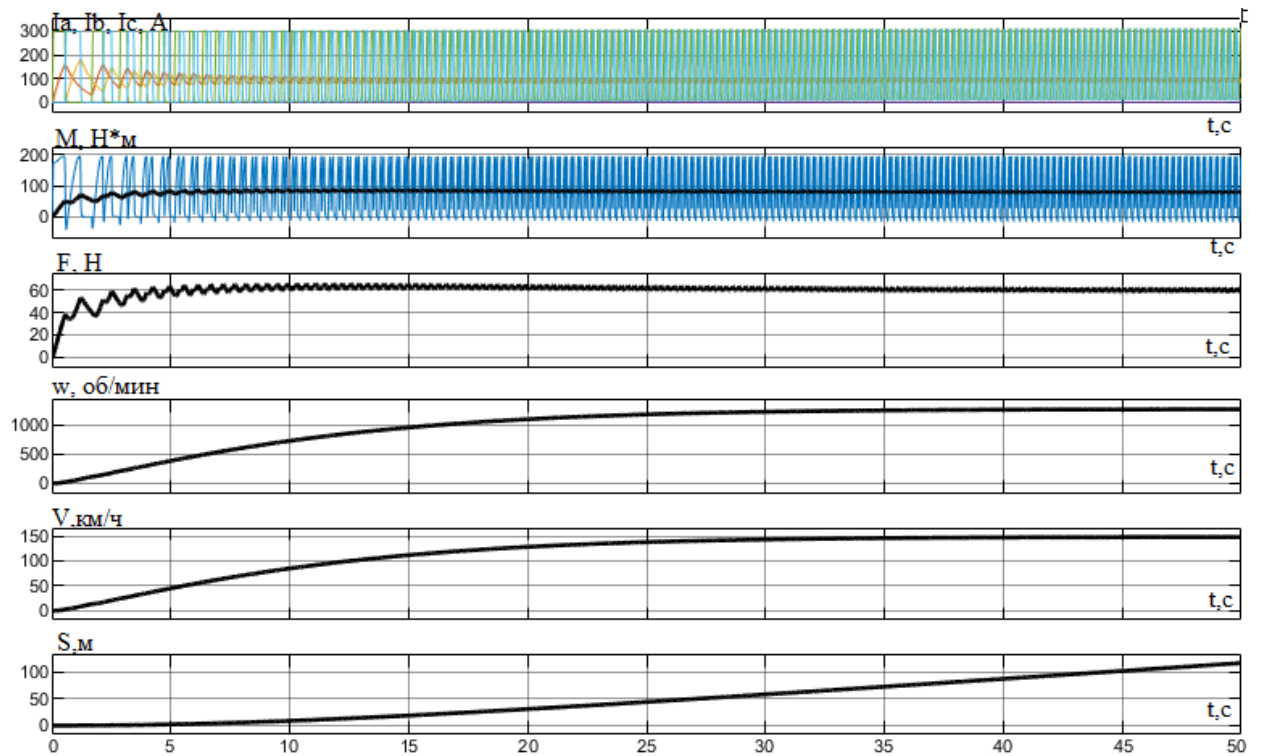


Рисунок 3.29 – Старт электромобиля на 2-х фазах при снаряженной массе

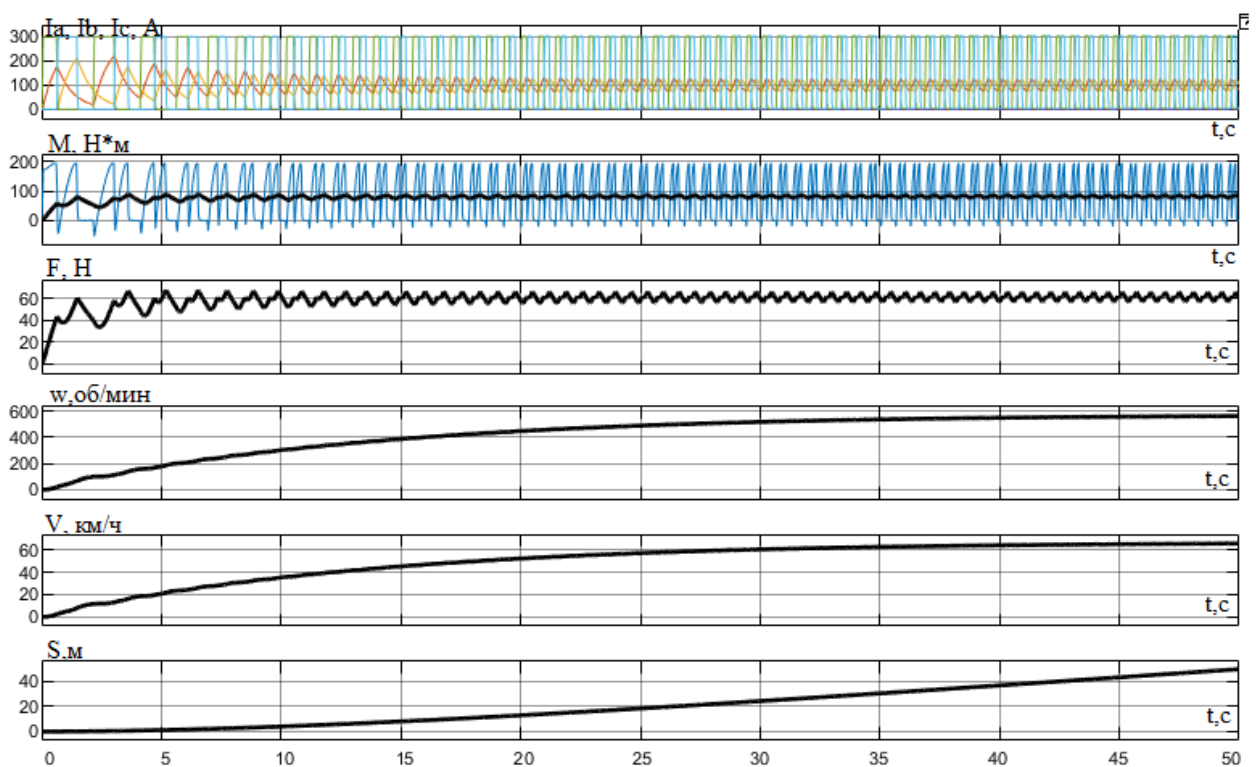


Рисунок 3.30 – Старт электромобиля на 2-х фазах при полной массе

Имея полную массу $m=1600$ кг электромобиль разгоняется свыше $V=120$ км/ч за 20 с и продолжает движение при отказе 1-й фазы со снижением

$$\delta = \frac{125 - 68}{125} \cdot 100\% = 45\%$$
 скорости движения на до $V=68$ км/ч. При отказе 2-х фаз скорость падает до $V=0$ км/ч. Движение электромобиля при полной массе и только 1-й рабочей фазе невозможно.

При снаряженной массе $m=1100$ кг электромобиль разгоняется до максимальной расчетной скорости $V=180$ км/ч за 20 с и продолжает движения на 2-х фазах (при отказе какой-либо фазы) с установившейся скоростью $V=150$

$$\delta = \frac{180 - 150}{180} \cdot 100\% = 20\%$$
 км/ч, что на меньше, чем при нормальном режиме

работы. Также существенным фактом является то, что электромобиль способен продолжать движение при отказе 2-й фазы, т.е. только при 1-й рабочей фазе.

Скорость движения при этом составляет $V=65$ км/ч, что на

$$\delta = \frac{180 - 65}{180} \cdot 100\% = 64\%$$
 ниже, чем при нормальном режиме работы. Однако

электромобиль способен продолжать движение с такой скоростью в течении длительного времени, что говорит о высокой надежности системы.

Другим преимуществом ВИП электромобиля является способность его пуска на 2-х фазах. При снаряженной массе $m=1100$ кг электромобиль разгоняется до $V=150$ км/ч и при полной массе $m=1600$ кг до $V=65$ км/ч, за 27 секунд и способен продолжать движение в течении длительного времени.

Старт электромобиля только при 1-й рабочей фазе невозможен даже при минимальной массе $m=1100$ кг.

На рис. 3.31 приведены характеристики скорости ТС, перемещения ТС при последовательном отказе фаз ВИД с алгоритмом отказоустойчивого управления (3.3).

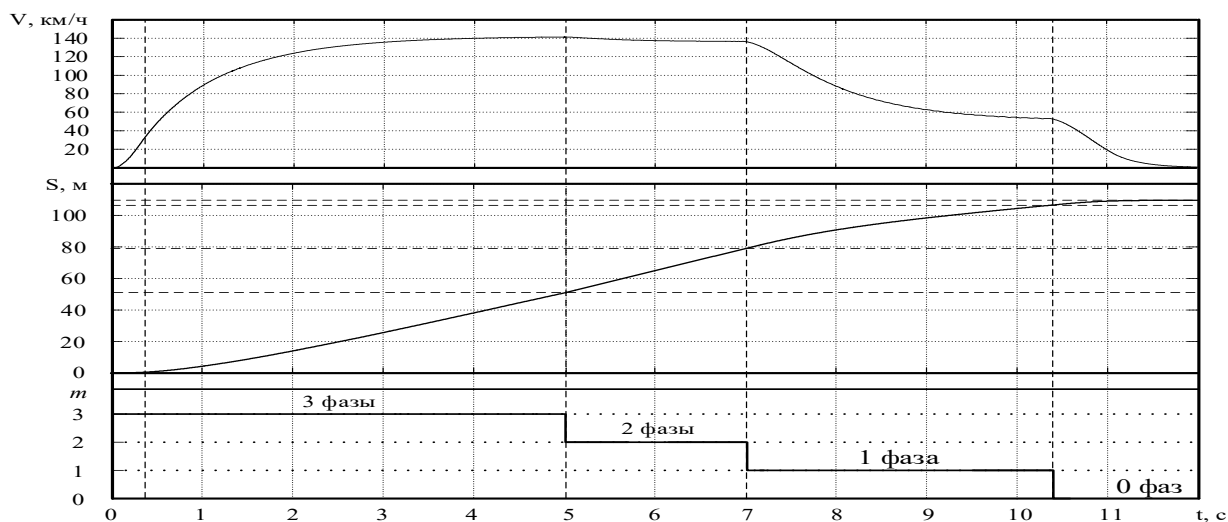


Рисунок 3.31. Характеристики ТС при последовательных отказах фаз электродвигателя с алгоритмом отказоустойчивого управления (3.3).

Из рис.3.31. следует, что при отказе одной фазы возможно восстановить заданную скорость ТС вплоть до 95% от начального значения при применении управления трехфазным вентильно-индукторным электроприводом с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов. При обрыве второй фазы показано, что значение скорости падает до уровня 43% от начального. Соответственно, при работе электродвигателя ТС с алгоритмом отказоустойчивого управления возможно сохранить заданное значение скорости и величину перемещения после обрыва одной фазы электродвигателя и частичное значение при обрыве двух фаз.

Выводы по главе 3.

Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазным вентильно-индукторным электроприводом, позволяющие на основании результатов мониторинга обеспечить свойство живучести как при одиночных, так и при множественных отказах в одной или нескольких фазах электродвигателя с дальнейшим постепенным исчерпанием полного рабочего ресурса электропривода для ЭЦН и ТС.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВИД

4.1. Алгоритм бездатчикового управления ВИД в аварийном режиме работы

Бездатчиковое управление ВИД осуществляет система управления, которая анализирует изменения потока в фазах и определяет необходимые моменты коммутации обмоток ВИД, производит регулирование силового тока в фазных обмотках ВИД, рассчитывает текущую скорость вращения ротора. Величина потокоцепления на полюсах ВИД изменяется во времени, но ее направление соответствует оси поля статора фазы. В аварийном режиме ВИД при обрыве фазы необходимо перенаправить векторы магнитного потока для создания общего магнитного поля, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз [68-74]. Чтобы вывести общий вектор потока статора, вектора потоков фаз преобразуются в стационарной ортогональной двухосной системе координат d - q . На рис. 4.1 приведены векторные диаграммы потока Φ в осях d - q для разных конструкций 5-ти (10/8), 4-х (8/6), 3-х (6/4), фазного ВИД.

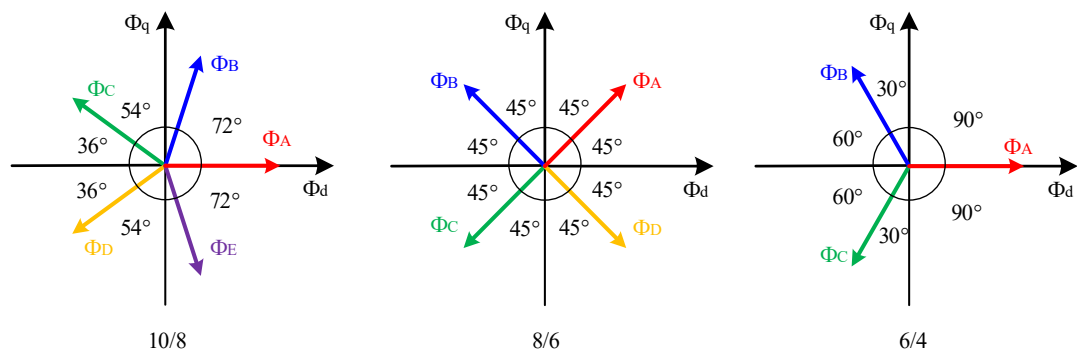


Рисунок 4.1. Векторные диаграммы потока Φ в осях d - q для разных конструкций 5-ти, 4-х, 3-х, фазного ВИД

Магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе ВИД с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора ВИД. Разработан алгоритм (4), позволяющий изменять углы векторов потока в соответствии с

количеством оставшихся в работе фаз в аварийном режиме. Необходимые углы векторов потока в фазах, в зависимости от числа оставшихся в работе фаз, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Углы векторов потока

X	σ_i , град.				
	A	B	C	D	E
5	0°	72°	36°	36°	72°
4	45°	45°	45°	45°	-
3	0°	60°	60°	-	-
2	0°	90°	-	-	-

Где b_i – бит отказа соответствующей фазы, N – число фаз ВИД, X – счетчик состояния ВИД, $\bar{\Phi}_i$ – вектор потока соответствующей фазы, Φ_d и $\bar{\Phi}_d$ – поперечная и продольная составляющая результирующего вектора суммарного потока в осях d - q , σ_i – взятый из таблицы угол вектора соответствующей фазы, σ – угол вектора $\Phi_{\text{общ}}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Phi}_d = \sum_{i=1}^X b_i \cdot \bar{\Phi}_i \cdot \cos(\sigma_i); \\ \bar{\Phi}_q = \sum_{i=1}^X b_i \cdot \bar{\Phi}_i \cdot \sin(\sigma_i); \\ X = \sum_{i=1}^N b_i; \\ \Phi_{\text{общ}} = \sqrt{\Phi_d^2 + \Phi_q^2}; \\ \sigma = \arctan\left(\frac{\Phi_q}{\Phi_d}\right). \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Рассмотрим работу четырехфазного ВИД топологии 8/6 в аварийном режиме с реализацией алгоритма переключения (4.1). Формирование векторов потока в нормальном рабочем режиме работы обеспечивает поочередную коммутацию полюсов фаз электродвигателя с рабочим углом $\pi/4$. При этом $X=4$, $(b_A = 1, b_B = 1, b_C = 1, b_D = 1)$. Принято, что вектор фазы А ориентирован в одном направлении с осью d .

$$\Phi_d = \Phi_A \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \Phi_D \cos\left(\frac{\pi}{4}\right);$$

$$\Phi_q = \Phi_A \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Phi_D \sin\left(\frac{\pi}{4}\right).$$

В аварийном режиме при отказе одной фазы необходимо изменить углы векторов потока на рабочий угол $\pi/3$ в соответствии с таблицей 3, чтобы избежать ошибки при расчете положения и скорости для правильной очередности переключения фаз. При этом $X=3$, $(b_A = 1, b_B = 1, b_C = 1, b_D = 0)$, тогда:

$$\Phi_d = \Phi_A - \Phi_B \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \cos\left(\frac{\pi}{3}\right);$$

$$\Phi_q = \Phi_A + \Phi_B \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - \Phi_C \sin\left(\frac{\pi}{3}\right).$$

В нормальном режиме работы формируется четыре матрицы коммутации полюсов фаз, по аналогии с ранее рассмотренными матрицами отказов. В аварийном режиме при отказе одной фазы двигатель теряет два полюса и переходит в трехфазный режим с тремя матрицами коммутации фаз.

Ниже приведены зависимости частоты вращения и тока для случая аварийного режима штатной четырехфазной модели без переключения структуры управления (рис. 4.2) и в случае работы с алгоритмом управления (4.1) под аварийный режим (рис. 4.2.). Показано, что при работе без переключения структуры управления (рис. 4.1.) после обрыва одной фазы (0.5 с.) электропривод перестает функционировать и реагировать на управление, токи в отдельных фазах возрастают в 5 раз от номинального уровня.

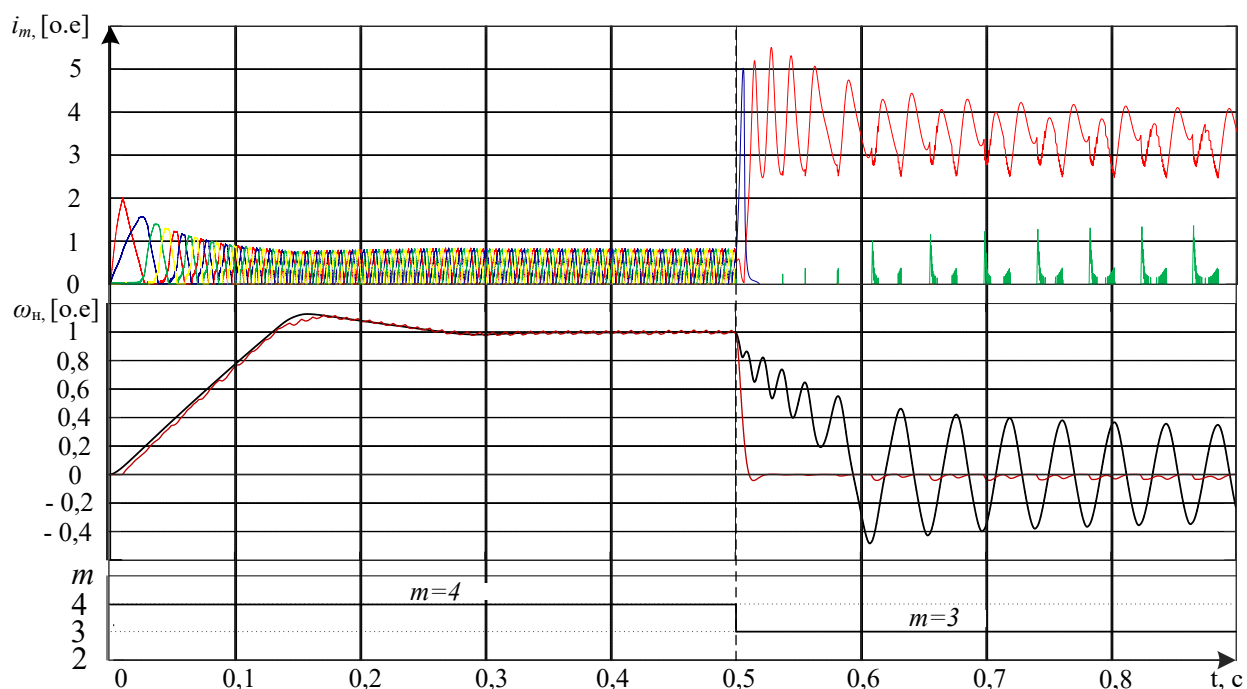


Рисунок 4.2. Зависимость токов фаз (i_m) и угловой частоты вращения ω в о.е.

В аварийном режиме 4-х фазного ВИД без переключения структуры управления.

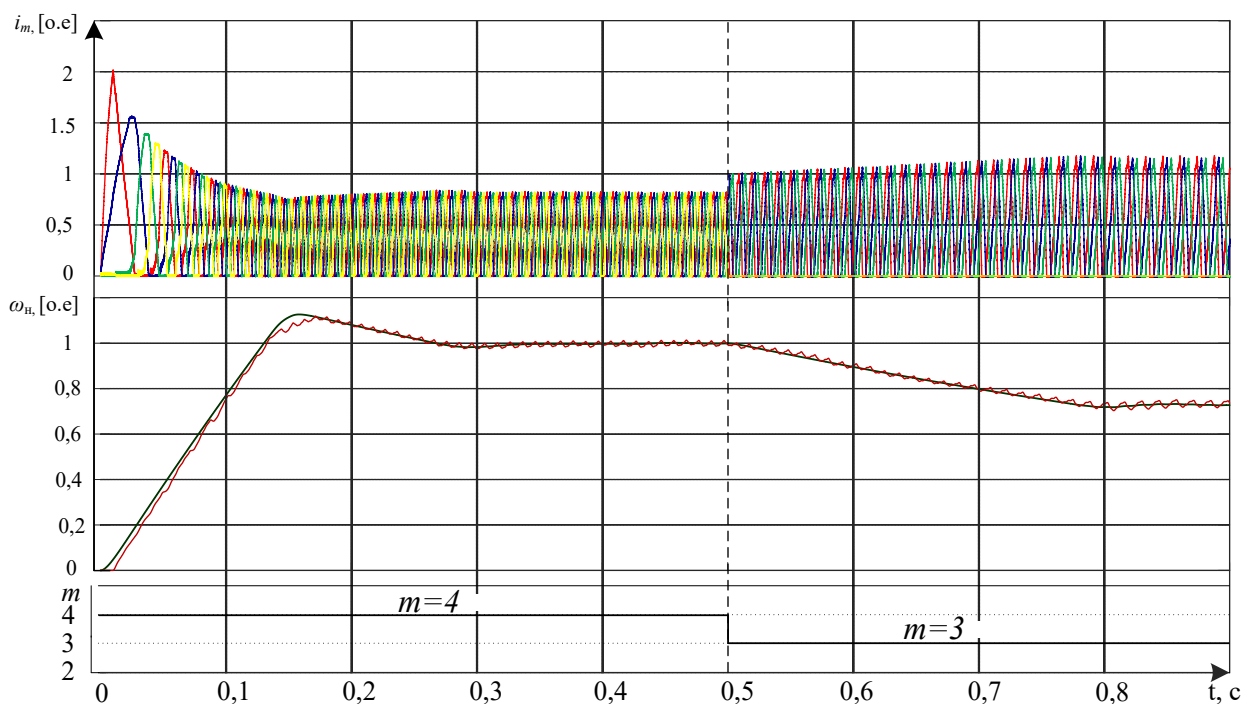


Рисунок 4.3. Зависимость токов фаз (i_m) и угловой частоты вращения ω в о.е.

В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом (4.1).

При использовании отказоустойчивого управления с переключением структуры (рис.4.3.) после обрыва одной фазы и перехода в 3-х фазный

режим работы 4-х фазного ВИД провал частоты вращения составляет 26% от номинального уровня и двигатель продолжает устойчивое функционирование в аварийном режиме работы. Значения токов возрастают в 1.2 раза от номинального значения. Разработана имитационная модель отказоустойчивого четырехфазного вентильно-индукторного электропривода, позволяющая исследовать работу ВИП в неполнофазном режиме работы.

4.2. Отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод насоса добычи или транспортировки нефти

На сегодняшний день нефтяная отрасль является основой развития Российского энергетического сектора. Очевидно, что необходимо обеспечивать полное функционирование производства на месторождениях и избегать простоев и недоотпуска нефти [125]. Одним из основных факторов, влияющих на непрерывность процесса добычи, является эффективное использование электрооборудования на участках цикла добычи [127]. Необходимо повышение отказоустойчивости исполнительных двигателей насосных агрегатов с целью предотвращения аварийных отключений насоса добычи нефти. Предложено использование вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) в качестве исполнительного двигателя насоса добычи или транспортировки нефти, это позволяет продолжить работу насоса после обрыва фазы статорной обмотки исполнительного двигателя [4, 68]. Существует ряд исследований, касающихся повышения отказоустойчивости [99, 101] ВИД, однако они преимущественно относятся к модернизации конструктивных особенностей ВИД, а не алгоритмического управления [58]. Следует отметить, что преимущества ВИД и некоторые существующие варианты повышения отказоустойчивости приведены в работах [102, 121, 149]. Аппаратное применение бездатчикового управления в погружных насосах с вентильным двигателем изучено и широко используется, например, группой компаний «Новомет» [4, 145, 147]. Существующие разработки показывают конкурентные преимущества этого

типа электродвигателя, однако не рассматривают работу ВИД в аварийных неполнофазных режимах работы [4]. В работе показано, что при доработке системы управления и применении алгоритма отказоустойчивого управления можно значительно повысить отказоустойчивость и применимость вентильно-индукторного электродвигателя за счет использования исполнения ВИД без датчика положения ротора, так как для погружного насоса добычи нефти блок телеметрии способен передавать из скважины только медленно меняющиеся сигналы технологического процесса [147, 148]. В реальных электромеханических комплексах насосных агрегатов положение ротора электродвигателя определяется путем математических вычислений на основе мгновенных значений токов и напряжений [47, 103]. Существующие системы с наблюдателями состояния не позволяют адекватно при помощи математического аппарата рассчитывать положение ротора в аварийном режиме, так как в структуры системы управления не заложено возникающее при отказе фазы смещение векторов потока, соответственно происходит ошибка расчета и модель перестает функционировать [65, 104, 105]. В отличие от имеющихся ранее рассмотренных разработок [4, 68-74], рассмотренное в диссертации решение позволяет реализовать работу исполнительного четырехфазного ВИД электроцентробежного насоса (ЭЦН) с бездатчиковым управлением в аварийном режиме работы, за счет переключения структуры управления со смещением векторов в соответствии с оставшимися в работе фазами [5].

4.2.1. Математическая модель бездатчикового вентильно-индукторного электродвигателя насоса добычи нефти в аварийном режиме работы.

В общем виде математическая модель насоса на базе ВИД с бездатчиковым управлением примет вид (4.2).

$$\left\{ \begin{array}{l}
\overline{\Phi_d} = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \cos(\sigma_j); \\
\overline{\Phi_q} = \sum_{j=1}^X b_j \cdot \overline{\Phi_j} \cdot \sin(\sigma_j); \\
X = \sum_{j=1}^N b_j; \\
\overline{\Phi_{\text{общ}}} = \sqrt{\overline{\Phi_d}^2 + \overline{\Phi_q}^2}; \\
\sigma = \arctan\left(\frac{\overline{\Phi_d}}{\overline{\Phi_q}}\right); \\
\Psi_j = \sum_j^F \Phi_j; \\
K_{\omega j} = \frac{\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)}{\partial \sigma}; \\
L_{dj} = \frac{\partial \Psi_j(i_j, \theta_j)}{\partial i_j}; \\
[R_M] = ([1] + k_\infty [M_o]) \cdot [R]; \\
\frac{d[i]}{dt} = [L_d]^{-1} \{ [U] - [R_M][i] - \omega [K_\omega] \}; \\
M = M_A(i_A, \theta_j) + M_B(i_B, \theta_j) + M_C(i_C, \theta_j) + M_D(i_D, \theta_j); \\
M_c(\omega) = M + (M_{c \max} - \Delta M_{c \text{ тр}} - \Delta M_{c \text{ ж}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x; \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c); \\
\theta_j = p \int_0^t \omega dt = p\theta; \\
Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}; \\
\frac{P}{\rho \cdot g} - H_{\text{фн}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x + S_f \cdot Q^2 = 0,
\end{array} \right. \quad (4.2)$$

где $[i]$ – матрица токов фаз статора ВИД; $[U]$ – матрица напряжений фаз ВИД; $[R]$ – матрица сопротивлений фаз ВИД; L_{dj} – дифференциальная индуктивность j -й фазой; $[L_d]$ – прямая матрица дифференциальных индуктивностей фаз ВИД в функции фазных токов и текущего расчетного положения ротора; Ψ_j – потокосцепление j -й фазы; F – число витков обмотки; $K_{\omega j}$ – коэффициент противо-ЭДС j -й фазы; $[K_\omega]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС фаз ВИД в функции фазных токов и расчетного положения

ротора; θ_j - угол поворота ротора формируемый j -й фазой; k_∞ – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора; J – суммарный момент инерции электропривода; $M_A(i_A, \theta_j), M_B(i_B, \theta_j), M_C(i_C, \theta_j), M_D(i_D, \theta_j)$ – моменты, развиваемые фазами A, B, C, D ; p - число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения ротора; M_c – момент сопротивления; ω_n – номинальное значение частоты вращения вала насоса; H_n – уровень напора на выходе насоса; H_{fn} – принятое «фиктивное» значение напора насоса на номинальной частоте вращения; H_3 – заданное значение напора; S_f – принятое значение гидравлического сопротивления насоса; ρ – значение плотности протекаемой жидкости; g – ускорение свободного падения; Z – волновое сопротивление кабеля; G_0 – диэлектрические потери; L_0 – индуктивность единицы длины КЛ; R_0 – продольное активное сопротивление КЛ с распределенными параметрами; C_0 – емкость единицы длины КЛ. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным $\Delta M_{с\text{тр}}$, момент сопротивления жидкости $\Delta M_{с\text{ж}}$.

Здесь в системе уравнений (4.2) строки с 1 по 5 это уравнения, составляющие алгоритм переключения структуры управления при бездатчиковом управлении ВИД (4.1), строка 6 уравнения формирования потокосцепления. Строки 7-8 ранее разработанные уравнения формирования матрицы сопротивлений и токов, рассмотренные подробно в статье [4] уравнения (3) и (4). Строки 9-10 уравнения формирования момента и нагрузки, доработанные под четырехфазный ВИД на базе уравнений из статьи [4] уравнения (6) и (9). Строка 11 основное уравнение движения электропривода, строка 12 расчет угла положения на основании расчетной частоты вращения, строка 13 уравнение учитывающее волновое сопротивление кабельной линии питания (КЛ), строка 14 уравнение статической модели центробежного насоса из статьи [4, 5] уравнение (8).

4.2.2. Алгоритмы бездатчикового отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электродвигателем насоса для добычи нефти.

В дополнение к рассмотренному выше алгоритму бездатчикового управления (4.1), целесообразно применить алгоритм отказоустойчивого управления четырехфазным ВИД с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз [4]. Доказано, что применение данного алгоритма (6) позволяет при отказе типа «обрыв фазы» уменьшить падение активной мощности ВИД за счет увеличения амплитудных значений токов в оставшихся функционирующих фазах.

$$\begin{cases} I_A = I_{\omega} b_A \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \theta_A) - \theta) \right] / 2; \\ I_B = I_{\omega} b_B \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \theta_B) - \theta) \right] / 2; \\ I_C = I_{\omega} b_C \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \theta_C) - \theta) \right] / 2; \\ I_D = I_{\omega} b_D \cdot k_d \left[1 + \text{sign}(\varphi(i_D, \theta_D) - \theta) \right] / 2. \end{cases} \quad (4.3)$$

Коэффициент k_d управления обеспечивает скачкообразное увеличение амплитуды фазных токов в аварийном режиме, здесь $k_d = \left(b_j + \overline{b_j} \cdot \frac{3}{2} \right)$, для компенсации активной мощности отказавшей фазы двигателя. При отсутствии отказа в j -й фазе: $b_j = 1, \overline{b_j} = 0, k_d = 1$; при наличии отказа в j -й фазе $b_j = 0, \overline{b_j} = 1, k_d = \frac{3}{2}$.

В общем виде блок схема совместной работы алгоритмов отказоустойчивого бездатчикового управления (4.1) насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз (6) примет вид как показано на рис. 4.4.

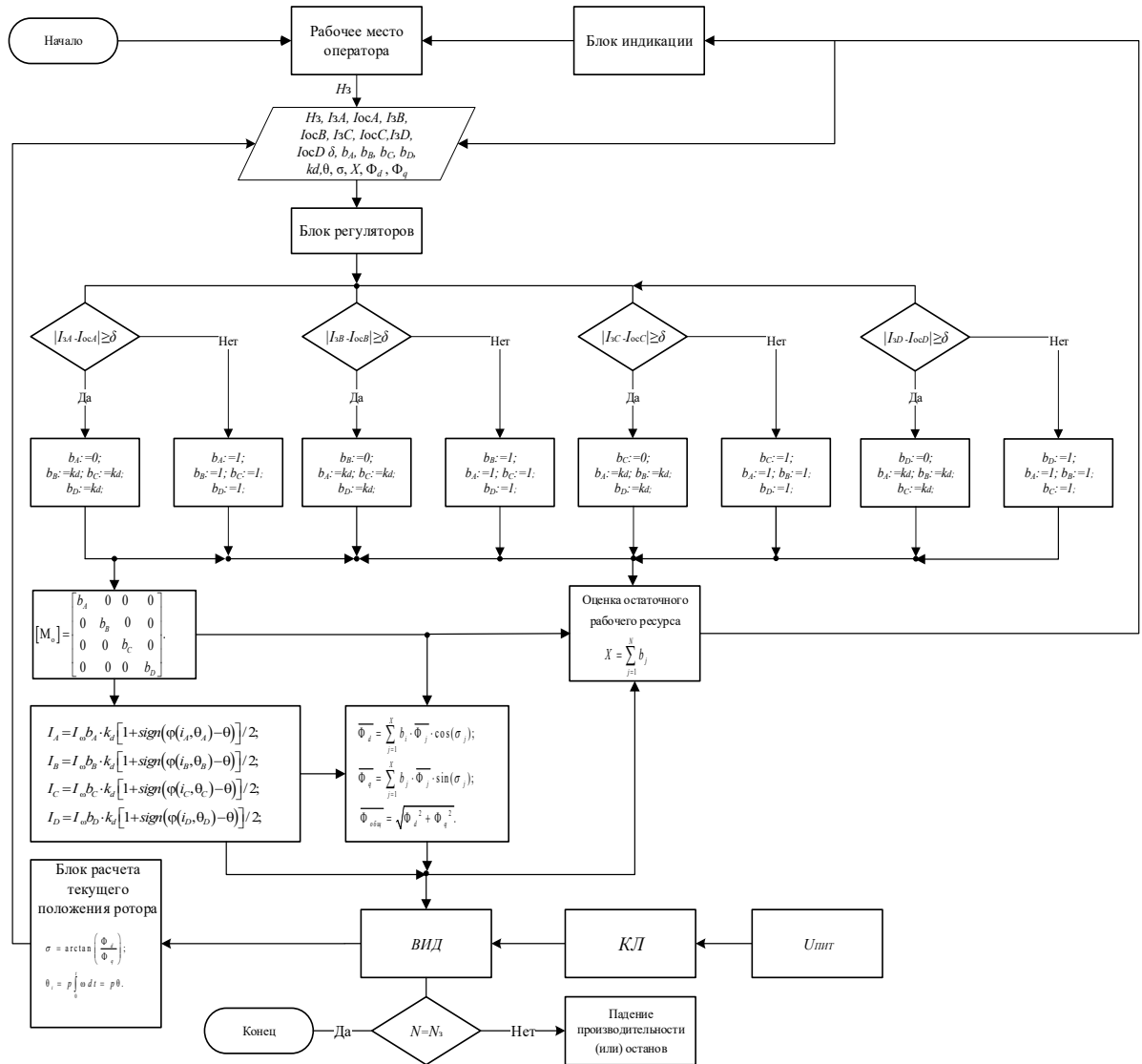


Рисунок 4.4. Блок-схема совместной работы алгоритма отказоустойчивого бездатчикового управления насосом добычи нефти с ВИД и алгоритма компенсации токов фаз.

Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД приведена на рисунке 4.5.

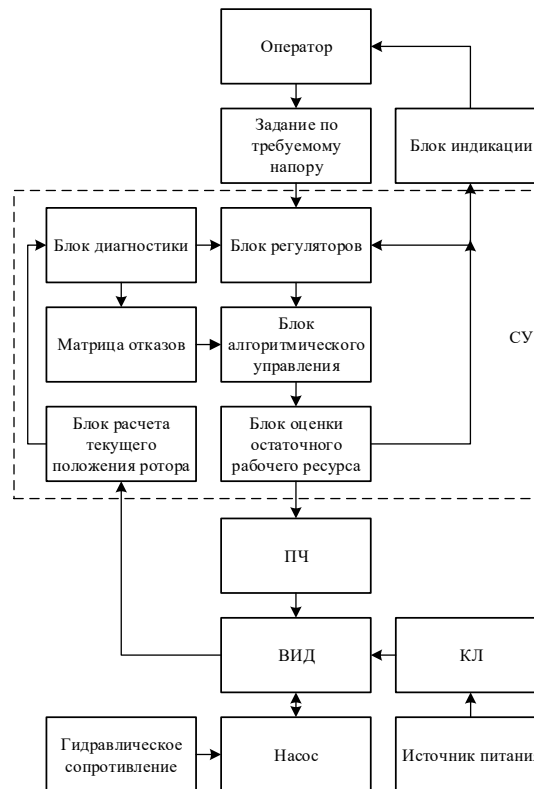


Рисунок 4.5. Функциональная блок-схема рассматриваемого насоса добычи нефти с ВИД

4.2.3. Имитационная модель бездатчикового отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса добычи нефти.

Основные принципы построения моделей блоков и систем вентильно-индукторного электропривода в среде имитационного моделирования MatLab Simulink ранее рассмотрены в ряде работ [1-4, 22-26, 110-113]. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем в качестве исполнительного с отказоустойчивым бездатчиковым векторным управлением показана на рисунке 4.6.

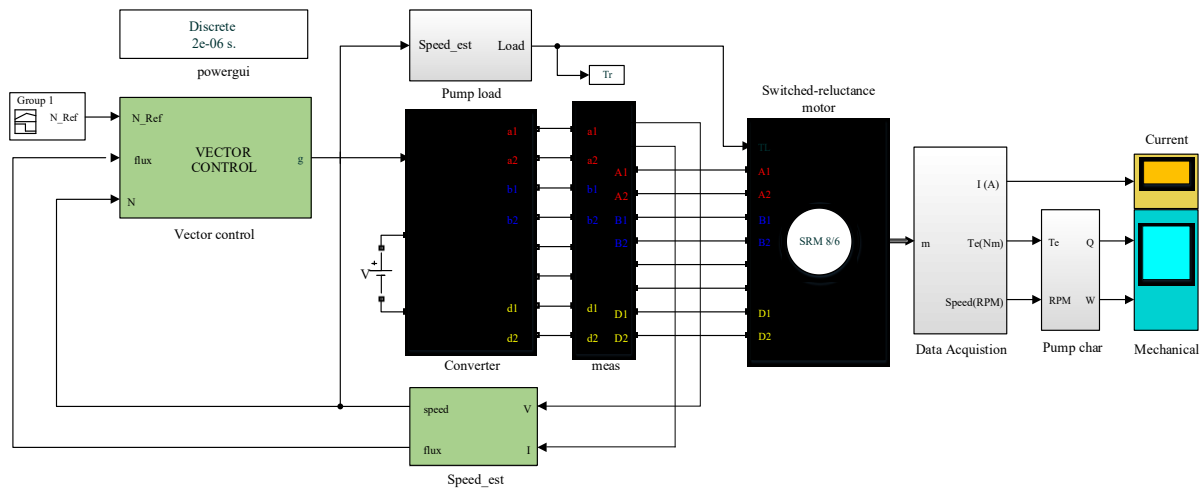


Рисунок 4.6. Структурная схема имитационной модели насоса добычи нефти с вентильно-индукторным электродвигателем с отказоустойчивым бездатчиковым управлением

Блок анализа задания и векторного управления и формирования сигналов на преобразователь частоты показан на рисунке 4.7.

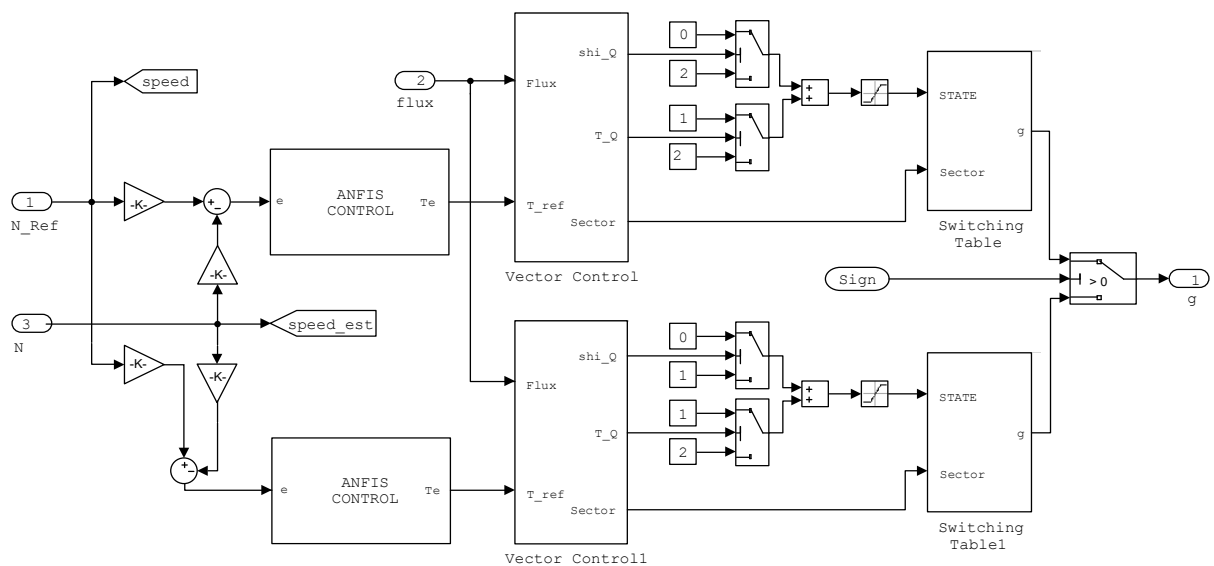


Рисунок 4.7. Структурная схема имитационной модели блока «Векторное управление»

При обрыве фазы значение входного сигнала «sign» изменится с 0 на 1 что приведет к переключению структуры системы управления с 4-х фазного ВИД топологии 8/6, на 3-х фазный с топологией 6/4. Это позволяет изменить матрицы коммутации ключей по секторам с учетом оставшегося количества рабочих полюсов фаз. Блок, формирующий вектора потока реализующий уравнения (3) и (4) показан на рисунке 4.8.

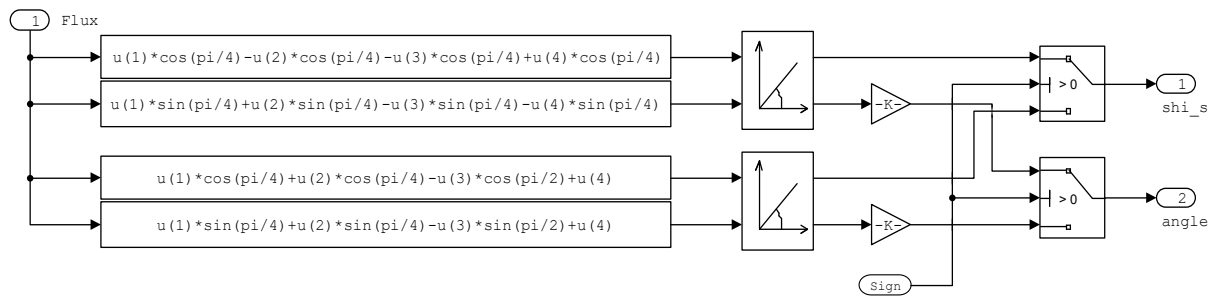


Рисунок 4.8. Структурная схема имитационной модели блока формирующего вектора потока

Здесь сигнал «sign» аналогично предназначен для переключения структуры бездатчикового управления в соответствии с таблицей 4.1 и рисунком 4.1.

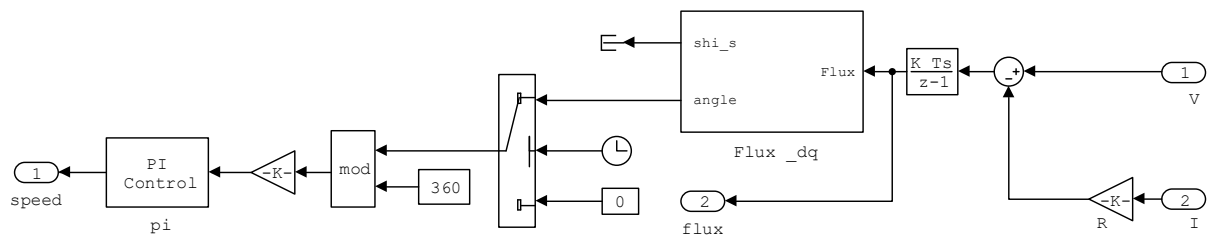


Рисунок 4.9. Структурная схема имитационной модели блока, рассчитывающего текущую скорость и положение ротора

Описание устройства блоков преобразователя частоты (ПЧ), кабельной линии (КЛ), блока регуляторов, блока возмущающего воздействия, и блока ЭЦН с ВИД рассмотрены в ранее опубликованных работах [4, 18-20].

4.3. Результаты моделирования.

Ниже приведены зависимости частоты вращения (ω , фиолетовая кривая), объемного расхода жидкости (Q , голубая кривая) и токов (i_m , красная кривая для фазы A , синяя для фазы B , зеленая для фазы C , желтая для фазы D) для случая аварийного режима штатной четырехфазной модели без переключения структуры бездатчикового управления (рис. 4.10), в случае работы с разработанным алгоритмом бездатчикового управления (4.1) в аварийном режиме работы (рис. 4.11), при работе с алгоритмом бездатчикового управления (4.1) и алгоритма компенсации токов (4.3), где m

– число функционирующих фаз двигателя (рис. 4.12). На графиках объемный расход (Q) показан пульсирующей кривой, это обусловлено особенностями работы ВИД как машины с пульсацией момента.

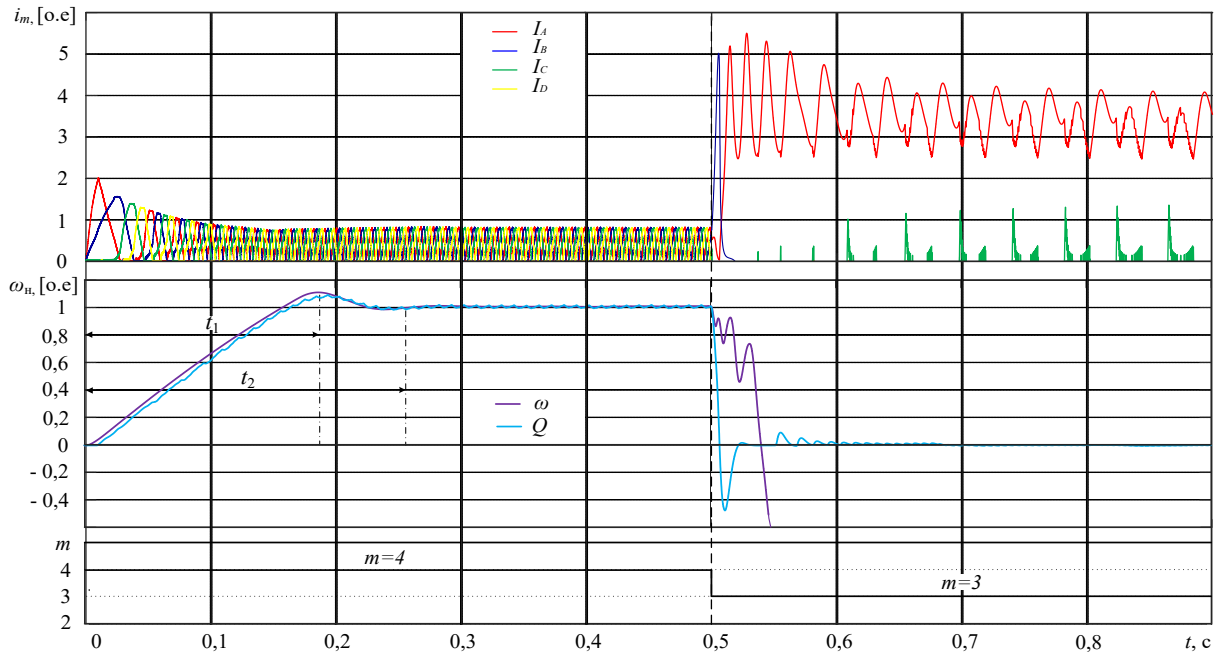


Рисунок 4.10. Зависимость токов фаз (i_m) угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД без переключения структуры управления

Показано, что при работе без переключения структуры управления (рис. 8) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электропривод насоса прекращает функционировать и реагировать на управление, токи в отдельных оставшихся подключенных к питанию фазах возрастают в 5 раз от номинального уровня. Время достижения первого максимума при пуске $t_1 = 0,19$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2 = 0,265$ с.

При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4.1) (рис.4.11.) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает функционировать с потерей мощности до уровня 0,62 от номинального значения. При этом значения токов в оставшихся в работе фазах на время переходного процесса возрастают на 25% не превышая пусковых значений токов. Время

достижения первого максимума при пуске $t_1 = 0,19$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2 = 0,265$ с. Время переходного процесса при переключении структуры управления $t_3 = 0,2$ с.

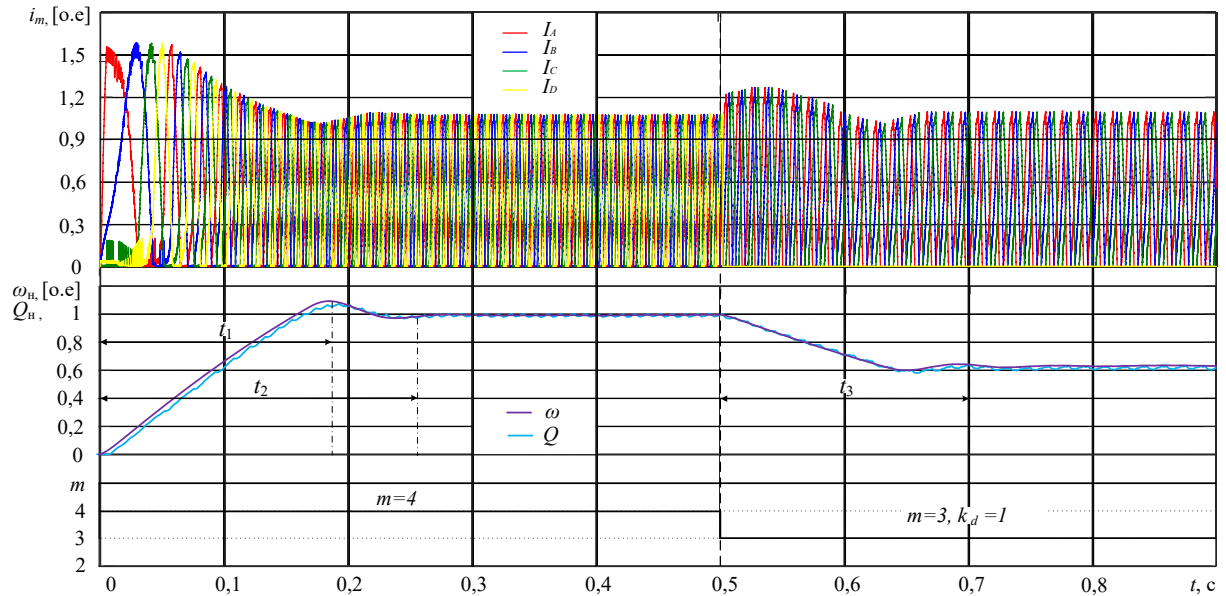


Рисунок 4.11. Зависимость токов фаз (i_m), угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного ВИД с алгоритмом бездатчикового управления (4.1)

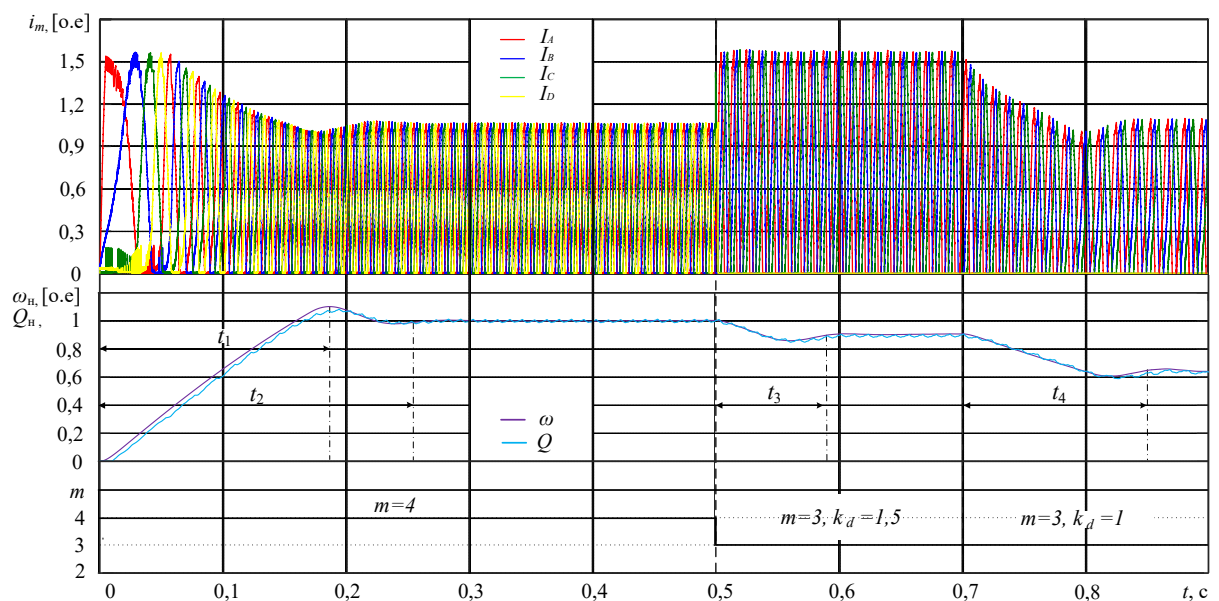


Рисунок 4.12. Зависимость токов фаз (i_m), угловой частоты вращения (ω), объемного расхода жидкости (Q) в о.е. В аварийном режиме 4-х фазного

ВИД с алгоритмом бездатчикового управления и алгоритмом компенсации токов (4.3)

При использовании алгоритма отказоустойчивого векторного бездатчикового управления (4.1) совместно с алгоритмом компенсации токов в оставшихся функционирующих фазах (4.3) (рис. 4.11.) после отказа типа «обрыв фазы» (0,5 с.) электродвигатель насоса продолжает свою работу в трехфазном режиме. На участке (0,5 с. – 0,7 с.) показана возможность работы с алгоритмом компенсации токов в оставшихся в работе фазах на уровне мощности 0,89 от заданного номинального уровня, значение токов в оставшихся в работе фазах повышается на $k_d = 1,5$. Время переходного процесса при переключении структуры управления на работу с алгоритмом компенсации токов $t_3 = 0,09$ с. Как видно из графика работа с алгоритмом компенсации позволяет сохранить близкую к требуемой мощность, но значительно увеличивает токи в оставшихся в работе фазах что может привести к перегреву и выходу из строя электродвигателя. Поэтому рассмотренный режим рекомендуется использовать как кратковременный в случае необходимости на непродолжительное время поднять крутящий момент и мощность насоса с дальнейшим переходом на трехфазный режим с уровнем 0,62 от номинального как показано на рис.4.10. На участке графика (0,7 с. – 0,9 с.) показан переход к трехфазному режиму работы без алгоритма компенсации токов, установившийся режим показан на графике в интервале от 0,85 до 0,9. Время достижения первого максимума при пуске $t_1 = 0,185$ с. Время пуска до установившегося значения $t_2 = 0,265$ с. Время обратного перехода на структуру с бездатчиковым алгоритмом управления $t_4 = 0,15$ с.

Выводы по главе 4.

1. Разработаны математическая и имитационная модели отказоустойчивого бездатчикового четырехфазного вентильно-

индукторного электропривода насосного агрегата в аварийном режиме работы.

2. Показано, что при использовании алгоритма бездатчикового отказоустойчивого управления насосом с вентильно-индукторным электродвигателем в аварийном режиме работы после отказа типа «обрыв фазы» происходит переключение структуры управления и электродвигатель продолжает функционировать с потерей мощности 38 % от номинального заданного уровня частоты вращения вала электродвигателя насоса. Данный алгоритм допускает долговременную эксплуатацию насосного агрегата на оставшихся в работе фазах без риска перегрева обмоток электродвигателя.

3. При совместном использовании алгоритма бездатчикового управления и алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов после отказа типа «обрыв фазы» электродвигателя работоспособность можно кратковременно восстановить до уровня 89 % от номинального заданного значения частоты вращения вала электродвигателя с минимальным снижением требуемого уровня объемного расхода жидкости, с дальнейшим переходом на длительный режим 62 % уровня от номинального без использования алгоритма компенсации токов.

ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЭЛЕКТРОПРИВДА.

Прежде чем переходить к вопросам отказоустойчивости системы, необходимо определить узлы системы где отказы наиболее вероятны. Причем отказы электрической части электропривода в данной работе более интересны. Таковыми отказами являются: отказ датчика положения ротора, отказ источника питания многосекционного ВИД, обрыв одной или нескольких фаз односекционного ВИД до исчерпания ресурса, обрыв одной или нескольких фаз двухсекционного ВИД. Это позволяет определить какие же методы обеспечения отказоустойчивого управления ВИП можно применить. Основные методы приведены на рисунок 5.1



Рисунок 5.1. Методы обеспечения отказоустойчивого управления ВИП

В главе 1 был рассмотрен пример 2-х секционного ВИД с горячим резервом и несколькими источниками питания [66], было описано отказоустойчивое управление, заложенное в ЭМ с независимым питанием фаз обмоток [68]. Далее будет рассмотрена функциональная схема 2-х секционного ВИП с горячим резервом с независимыми источниками питания каждого преобразователя частоты.

Далее будут приведены технические решения по построению отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода.

5.1. Разработка преобразователя для коммутации обмоток ВИД

В настоящее время для коммутации обмоток ВИД разработано и применяется большое количество преобразователей. Многообразие решений по топологии схем питания обмоток ВИД объясняется двумя факторами:

- 1) стремлением улучшить электромагнитные процессы с целью получения требуемых электромеханических характеристик;
- 2) минимизацией затрат на компоненты схем (в основном транзисторы, диоды и конденсаторы) [9].

Исходя из второго фактора, была разработана схема преобразователя частоты, преобразовательная ячейка которого изображена на рисунке 4.2.

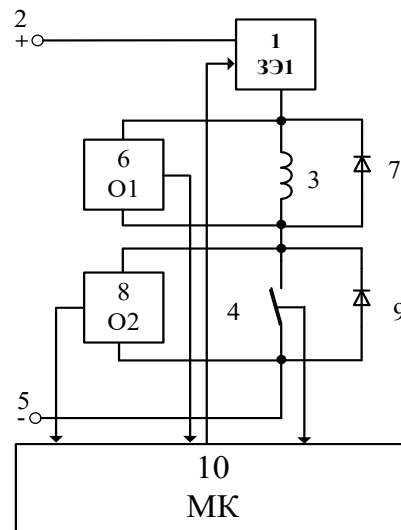


Рисунок 5.2. Однотактная схема импульсного регулятора напряжения вентильно-индукторного электродвигателя

Задачей системы является диагностика состояния элементов и выявление неисправности типа «обрыв фазы», «невключение» или «невывключение» силового ключа. И обеспечение системой высокого уровня отказоустойчивости.

Однотактная схема импульсного регулятора напряжения вентильно-индукторного электродвигателя содержит защитный элемент 1 (ЗЭ1), подключенный к положительному выводу 2 источника питания и первому выводу фазы обмотки статора 3. Силовой ключ 4 соединен со вторым выводом фазы обмотки статора 3 и отрицательным выводом 5 источника питания. Параллельно фазе обмотки статора 3 подключены оптрон 6 (O1) и диод 7. Анод диода 7 подключен к точке соединения второго вывода фазы обмотки статора 3 и силового ключа 4, а катод – к точке соединения первого вывода фазы обмотки статора 3 и защитного элемента 1 (ЗЭ1). Параллельно силовому ключу 4 подключены оптрон 8 (O2) и диод 9. Анод диода 9 подключен к отрицательному выводу 5 источника питания, а катод – к точке соединения второго вывода фазы обмотки статора 3 и силового ключа 4. Защитный элемент 1 (ЗЭ1), силовой ключ 4 и выводы оптронов 6 (O1) и 8 (O2) подключены к микроконтроллеру 10. В роли силового ключа 4 может выступать IGBT транзистор.

Каждый оптрон выполнен по схеме, приведенной на рисунке 5.3.

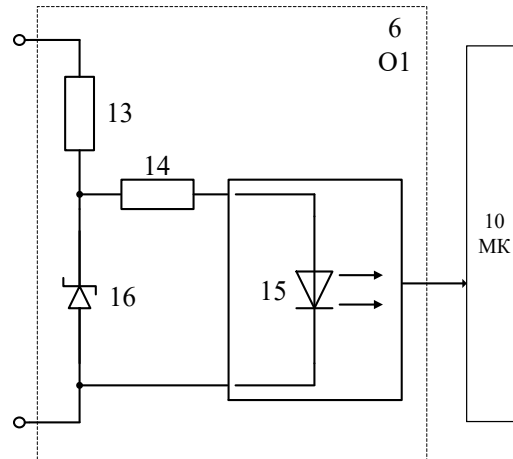


Рисунок 5.3. Исполнение оптронного элемента

Оптроны 6 (O1), 8 (O2) выполнены одинаково, состоят каждый из двух последовательно соединенных ограничительных резисторов 13, 14, оптрона 15, анод диода которого подключен к резистору 14, и стабилитрона 16, катод которого подключен к точке соединения резисторов 13, 14, а анод к катоду диода оптрона 15. Вывод оптрона 15 подключен к микроконтроллеру 10.

Защитные элементы выполнены в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 4.4.

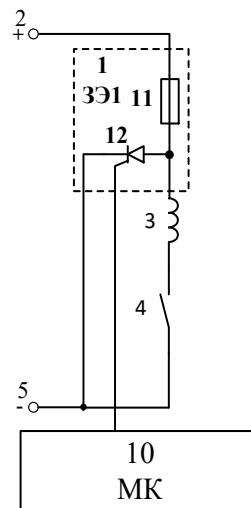


Рисунок 5.4. Исполнение защитного элемента

Защитный элемент 1 (ЗЭ1) состоит из плавкой вставки 11, подключенной одним концом к плюсовому выводу 2 источника питания, а

другим концом к фазе обмотки статора 3 и к аноду тиристора 12, катод которого подключен к отрицательному выводу 5 источника питания. Управляющий электрод тиристора 12 подключен к микроконтроллеру 10 (МК). [9, 10]

5.1.1. Принцип работы ячейки, обеспечивающей работу и диагностику состояния вентильно-индукторного двигателя

Метод тестового контроля позволяет при построении датчика состояния ячейки по цифровой схеме не только сформировать бит отказа в каждой преобразовательной ячейке, но и иметь информацию о диагностическом состоянии ячейки. Кроме того, за счет контроля одновременной работы двух ключей при мостовой схеме построения преобразовательной ячейки можно контролировать и работу блока управления преобразовательными ячейками [10].

Логические сигналы, поступающие в микроконтроллер 10 (МК) с выводов оптронов 6 (O1), 8 (O2) и силового ключа 4 присваиваются соответственно первому, второму и третьему битам слова состояния однотактной схемы импульсного регулятора напряжения. Причем логическое единицы, поступающей с оптронов 6 (O1) и 8 (O2), соответствуют наличию напряжения на диагностируемом элементе схемы, а логическому нулю – отсутствие напряжения. Логическая единица, поступающая от силового ключа, сигнализирует включение ключа, а логический ноль – выключение. Полученное слово состояния сравнивается с возможными вариантами состояния однотактной схемы импульсного регулятора напряжения, представленными в таблице 5.1, после чего происходит формирование соответствующих сигналов управления регулятора напряжения. В случае наличия неисправности типа «невывключение» ключа формируется бит отказа импульсного регулятора напряжения типа «невывключение». Бит отказа типа «невывключение» включает защитный элемент 1 (ЗЭ1) (рисунок 5.4), и происходит перегорание плавкой вставки 11 по принудительно включаемому

коротящему тиристор 12, в результате чего обеспечивается блокирование отказавшего импульсного регулятора напряжения. В случае выявления неисправностей типа: «невключение» ключа или обрыв обмотки статора, формируется бит отказа импульсного регулятора напряжения типа «невключение». Срабатывание защитного элемента 1 (ЗЭ1) не происходит.

Такой подход позволяет уменьшить время на поиск и замену неисправного блока и обеспечить быстрое восстановление неисправных блоков, так как известно место отказа вплоть до элемента силовой цепи. Такое техническое решение позволяет проводить диагностику состояния элементов схемы и выявлять неисправности типа «обрыв фазы», «невключение» или «невывключение» силового ключа. Такой цифровой датчик состояния преобразовательной ячейки электропривода позволяет обеспечить гальваническую развязку между силовой и информационной цепью.

Таблица 5.1. Варианты состояния одноконтурной схемы импульсного регулятора напряжения

№ состояния диагностики регулятора в алгоритме МК	Номер бита слова состояния импульсного регулятора напряжения			Диагностическое состояние импульсного регулятора напряжения
	1	2	3	
1	0	0	0	Схема выключена
2	0	0	1	Обрыв фазы обмотки статора
3	0	1	0	На обмотке статора нет напряжение
4	0	1	1	«Невключение» ключа
5	1	0	0	«Невыключение» ключа
6	1	0	1	На обмотке статора есть напряжение

5.2. Функциональная схема отказоустойчивого двухсекционного вентильно-индукторного электропривода

Двухсекционный вентильно-индукторный двигатель подключен к каждой преобразовательной ячейке через датчики тока, которые связаны с микроконтроллером. Защитные элементы подключены к каждой преобразовательной ячейке каждого n -го преобразователя частоты и к соответствующему источнику питания. Преобразовательные ячейки подключены к отрицательному выводу соответствующего источника питания. Все защитные элементы и преобразовательные ячейки подключены к микроконтроллеру. На валу вентильно-индукторного электродвигателя установлен датчик положения, который связан с микроконтроллером, к которому подключен датчик частоты вращения вала электродвигателя. (рисунок 5.5).

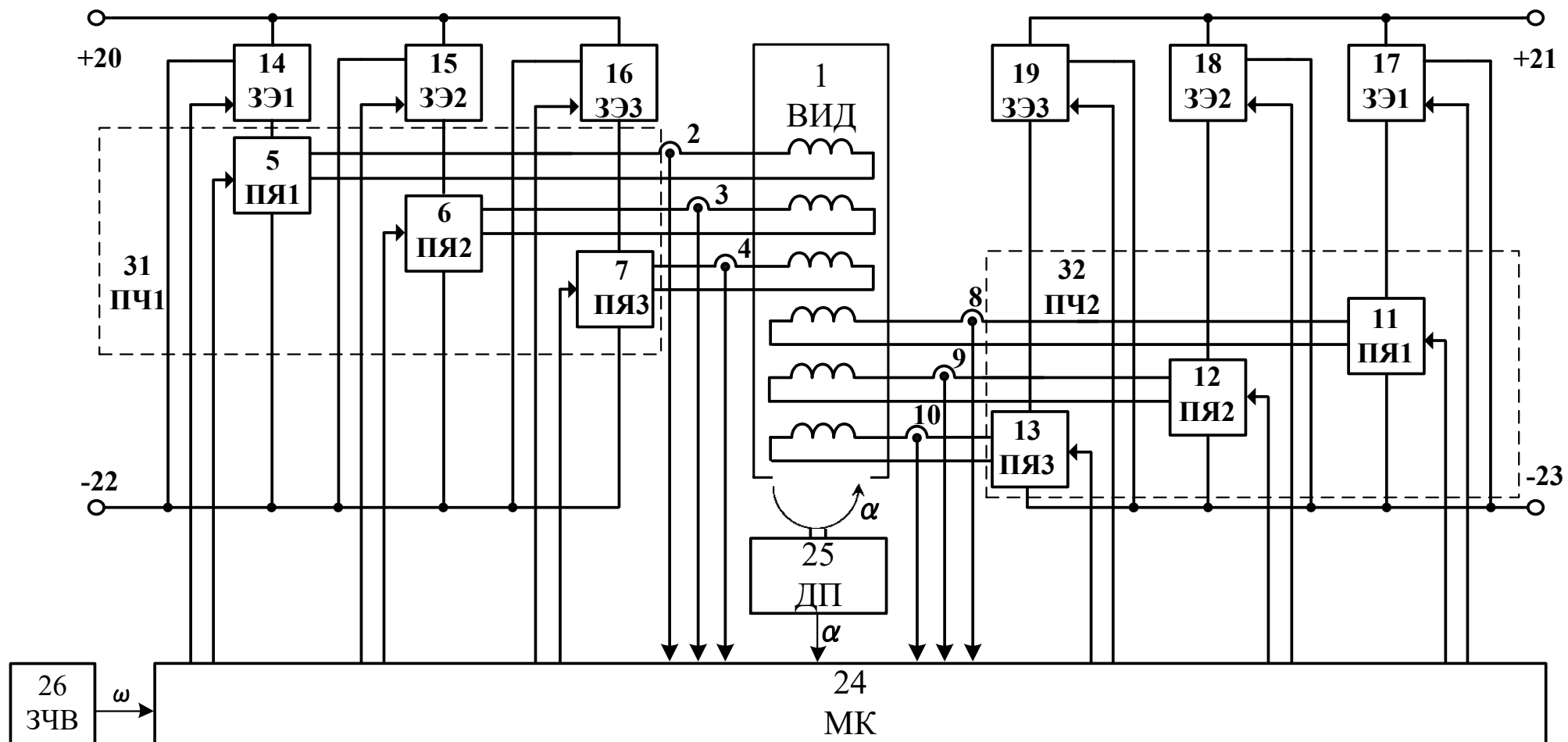


Рисунок 5.5. Функциональная схема отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода

Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести (рисунок 4.5) содержит двухсекционный вентильно-индукторный двигатель 1 (ВИД), который через датчики тока 2, 3, 4 соответственно подключен к преобразовательным ячейкам 5 (ПЯ1), 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3). Вентильно-индукторный двигатель 1 (ВИД) через датчики тока 8, 9, 10 соответственно подключены к преобразовательным ячейкам 11 (ПЯ4), 12 (ПЯ5), 13 (ПЯ6). Преобразовательные ячейки 5 (ПЯ1), 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3) соответственно соединены с защитными элементами 14 (ЗЭ1), 15 (ЗЭ2), 16 (ЗЭ3), а преобразовательные ячейки 11 (ПЯ4), 12 (ПЯ5), 13 (ПЯ6) соответственно соединены с защитными элементами 17 (ЗЭ4), 18 (ЗЭ5), 19 (ЗЭ6). Защитные элементы 14 (ЗЭ1), 15 (ЗЭ2), 16 (ЗЭ3) подключены к плюсовому выводу 20 первого источника питания. Защитные элементы 17 (ЗЭ4), 18 (ЗЭ5), 19 (ЗЭ6) подключены к плюсовому выводу 21 второго источника питания. К выводам преобразовательных ячеек 5 (ПЯ1), 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3), подключен отрицательный вывод 22 первого источника питания. К выводам преобразовательных ячеек 11 (ПЯ4), 12 (ПЯ5), 13 (ПЯ6) подключен отрицательный вывод 23 второго источника питания. Выходы датчиков тока 2, 3, 4, 8, 9, 10 подключены к микроконтроллеру 24 (МК). На валу вентильно-индукторного двигателя 1 (ВИД) установлен датчик положения 25 (ДП), выход которого подключен к микроконтроллеру 24 (МК). Задатчик частоты вращения вала двигателя 26 (ЗЧВ) подключен к микроконтроллеру 24 (МК) [8].

5.2.1. Описание работы функциональной схемы.

Входной величиной вентильно-индукторного электропривода со свойством живучести является сигнал с задатчика частоты вращения 26 (ЗЧВ), который поступает в микроконтроллер 24 (МК). Фазные токи двигателя, определяемые с помощью датчиков тока 2, 3, 4, 8, 9, 10, и угол поворота вала двигателя, который определяется с помощью датчика положения 25 (ДП), поступают на микроконтроллер 24 (МК), в котором вырабатываются задания на

токи для каждой фазы электродвигателя, поступающие в преобразовательные ячейки 5 (ПЯ1), 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3), 11 (ПЯ4), 12 (ПЯ5), 13 (ПЯ6).

Микроконтроллер 24 (МК), на основе анализа соответствующих фазных токов и сигналов поступающих с цифрового датчика выполненного на основе оптронов, производит непрерывную диагностику рабочего состояния преобразовательных ячеек 5 (ПЯ1), 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3), 11 (ПЯ4), 12 (ПЯ5), 13 (ПЯ6), и в случае наличия неисправности типа «невывключение» ключа, например силового ключа преобразовательной ячейки 5 (ПЯ1) (рисунок 4.2), формируется бит отказа преобразовательной ячейки 5 (ПЯ1) типа «невывключение». Бит отказа типа «невывключение» включает соответствующий защитный элемент, например 14 (ЗЭ1) (рисунок 5.4), и происходит перегорание плавкой вставки 27 по принудительно включаемому коротящему тиристор 28, в результате чего обеспечивается блокирование отказавшей преобразовательной ячейки, например 5 (ПЯ1) трехфазного преобразователя частоты 31 (ПЧ1), при этом оставшиеся 2 преобразовательные ячейки 6 (ПЯ2), 7 (ПЯ3), первого независимого канала продолжают свою работу.

Соответствующая преобразовательная ячейка 11 (ПЯ4) второго независимого канала получает увеличенное задание на ток, в результате чего происходит компенсация момента двигателя, без формирования тормозного момента.

В нормальном режиме работы преобразовательной ячейки, например 5 (ПЯ1), (рисунок 5.2) силовой ключ работает в импульсном режиме, после выключения ключа в паузе коммутации ток статорной обмотки замыкается через открытый диод. В случае выявления неисправностей типа: «невывключение» ключа преобразовательной ячейки, например 5 (ПЯ1), или обрыве обмотки статора, формируется бит отказа преобразовательной ячейки типа «невывключение». Срабатывание защитного элемента 14 (ЗЭ1) (рисунок 5.4) не происходит. Соответствующая преобразовательная ячейка 11 (ПЯ4) второго независимого канала получает увеличенное задание на ток, в результате чего

происходит компенсация момента электродвигателя выбывшей из работы фазы, но без провалов по моменту работающего электродвигателя.

В случае отказа одной из секций электродвигателя и при наличии соответствующей рабочей фазы другой секции, восстановление работоспособности произойдет без потери качества работы электропривода. При отказе одноименной фазы дальнейшее восстановление работоспособности возможно с потерей качества регулирования вследствие повышения амплитуды пульсаций магнитодвижущей силы. Предлагаемая структура электропривода с отказоустойчивым управлением позволяет обеспечить эффективные алгоритмы формирования токов в фазных обмотках с целью минимизации пульсаций магнитодвижущей силы. Для обеспечения такого алгоритма требуется, чтобы каждая m -фазная обмотка двухсекционного вентильно-индукторного электродвигателя поочередно запитывалась однополярным импульсом тока, для этого измеряется период сигнала фазы датчика положения ротора, вычисляются временные интервалы, определяющие начало и окончание зон импульсов управления силовыми ключами инвертора напряжения, по результатам измерений и вычислений формируется последовательность импульсов управления силовыми ключами каждой фазы [8].

Таким образом, обеспечивается функционирование электропривода с полным исчерпанием его избыточного структурного резерва за счет независимых каналов при $n \geq 2$ с повышенной отказоустойчивостью и обеспечением свойства живучести при аварийной ситуации в процессе непрерывной и длительной работы в составе технологического оборудования.

5.3. Разработка стенда для исследования ВИП.

В настоящее время ВИП практически не изучаются и наличие стенда позволяющего проводить лабораторные исследования данного типа электропривода позволило бы подробнее ознакомиться с функциональными особенностями ВИП.

Техническое решение позволяет проводить испытания как номинальных, так и аварийных и неполнофазных режимов работы вентильно-индукторного электропривода [11, 12].



Рисунок 5.6. Патент на полезную модель «Установка для исследований режимов работы вентильно-индукторного электропривода»

5.3.1. Анализ технологического процесса эксперимента и технологического оборудования как объекта исследования

Технологический эксперимент, эксперимент, в большинстве случаев основной целью которого является разработка новой или улучшение имеющейся технологии т.е. технологическая эволюция. Эксперимент, связанный с исследованием качественных и (или) количественных характеристик некоторого технического устройства. [116, 117]

В работе технологическим процессом является процесс проведения технологического эксперимента по исследованию отказоустойчивости вентильно-индукторного электропривода. Данный процесс реализуется на специальном экспериментальном стенде для исследования возможностей отказоустойчивости вентильно-индукторного электропривода. Данный техпроцесс можно назвать «единичным» так как он разрабатывается индивидуально для конкретного механизма и сводится к следующим этапам:

1. Включение стенда
2. Имитация отказов, возникающих в электроприводе.
3. Снятие необходимых характеристик электропривода
4. Выключение стенда
5. Анализ полученных данных

Перейдем подробнее к стенду и рассмотрим вышеприведенные этапы процесса.

На рисунке 5.7 представлена функциональная схема установки для исследований режимов работы вентильно-индукторного электропривода.

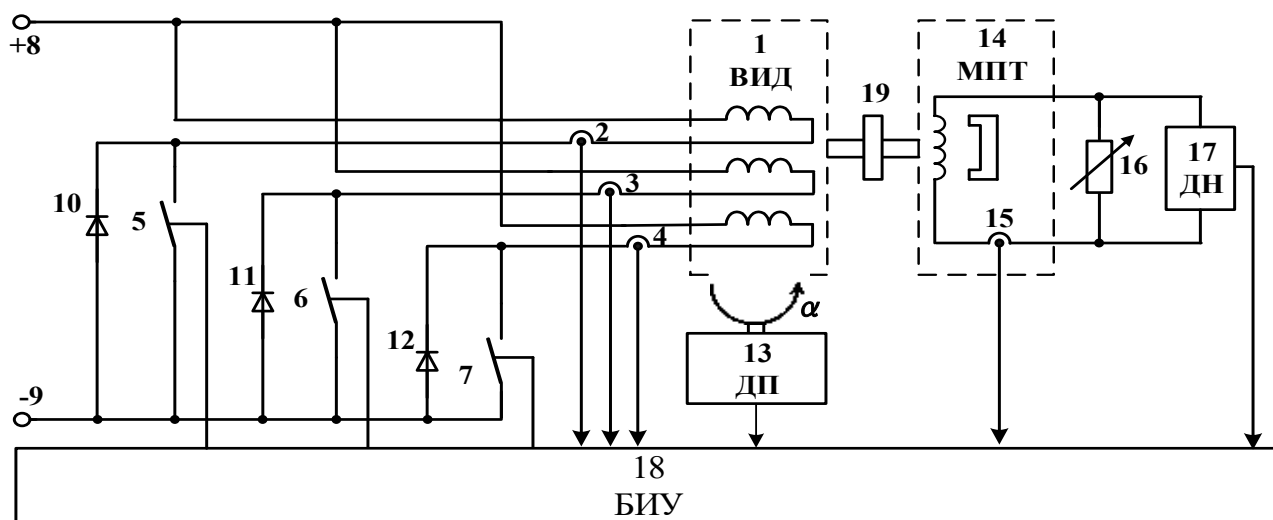


Рисунок 5.7. Стенд для исследования работы вентильно-индукторного электропривода

Установка для исследований режимов работы вентильно-индукторного электропривода (рисунок 5.7) содержит вентильно-индукторный двигатель 1 (ВИД), каждая фаза обмотки статора которого подключена к

соответствующему датчику тока 2, 3, 4, который подключен к соответствующему управляемому силовому ключу 5, 6, 7. Параллельно каждому силовому ключу 5, 6, 7 соответственно подключены диоды обратного тока 10, 11, 12. Каждая фаза статорной обмотки вентильно-индукторного двигателя 1 (ВИД) подключена к положительному выводу 8 однополярного источника питания и через силовые ключи 5, 6, 7 к отрицательному выводу 9 однополярного источника питания. Вал вентильно-индукторного электродвигателя 1 (ВИД) соединен с датчиком углового положения ротора 13 (ДП). К якорной обмотке машины постоянного тока 14 (МПТ) подключен датчик тока 15. Через датчик тока 15 к машине постоянного тока 14 (МПТ) параллельно подключен нагрузочный резистор 16 с изменяющимся сопротивлением, параллельно которому подключен датчик напряжения 17 (ДН). Выходы датчиков тока 2, 3, 4, 15, напряжения 17 (ДН) и углового положения ротора 13 (ДП), управляемые силовые ключи 5, 6, 7 подключены к блоку электрических измерений и управления 18 (БИУ). Вентильно-индукторный двигатель 1 (ВИД) и машина постоянного тока 14 (МПТ) соединены через муфту 19 и установлены на монтажную раму (не показана). Машина постоянного тока используется в качестве нагрузочной машины. [26]

Работа испытательного стенда осуществляется следующим образом. При замкнутых ключах с двухсторонней проводимостью происходит подключение фаз обмоток статора исследуемого двигателя к выводам источника питания. Датчики тока фиксируют значения фазных статорных токов двигателя переменного тока. Совмещенный датчик положения и скорости фиксирует частоту вращения ротора двигателя и его текущий угол положения. Напряжение на выводах машины постоянного тока и ток якоря измеряются датчиками напряжения и тока соответственно. Данные с датчиков поступают в блок электрических измерений и управления. С помощью блока нагрузки машины постоянного тока формируются различные значения момент нагрузки двигателя переменного тока. На основе полученных данных блок электрических измерений и управления производит построение механических и

электромеханических характеристик для различных режимов работы двигателя переменного тока. Блок электрических измерений и управления вырабатывает статический или импульсный сигнал на отключения ключа с двухсторонней проводимостью. По данным, поступившим в блок электрических измерений и управления с датчиков, производится построение электромеханических и механических характеристик двигателя переменного тока в аварийном режиме работы [12].

5.3.2. Иерархия уровней АСУ технологическим экспериментом

Рассмотрим иерархию уровней автоматической системы управления (АСУ) технологическим экспериментом (ТЭ) по исследованию отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя (Рисунок 5.8).

Верхний уровень: Автоматизированное рабочее место оператора.

Средний уровень: источник бесперебойного питания (ИБП), Блок защитной аппаратуры и коммутирующей аппаратуры, блок имитации аварийного режима работы (БИА), Измерительно-вычислительный комплекс, контроллер.

Нижний уровень: Преобразователь частоты (ПЧ), отказоустойчивый вентильно-индукторный электродвигатель (ВИД), нагрузочная машина постоянного тока (МПТ), управляемый блок формирования нагрузки, датчики тока (ДТ), совмещенный датчик положения и скорости (ДП/ДС), датчик напряжения (ДН), аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Питание датчиков и АЦП отдельными связями не показано.

На рисунке 5.8 приведена иерархия уровней АСУ ТЭ в виде блок-схемы аппаратных средств автоматизации, разделенной по соответствующим уровням [116].

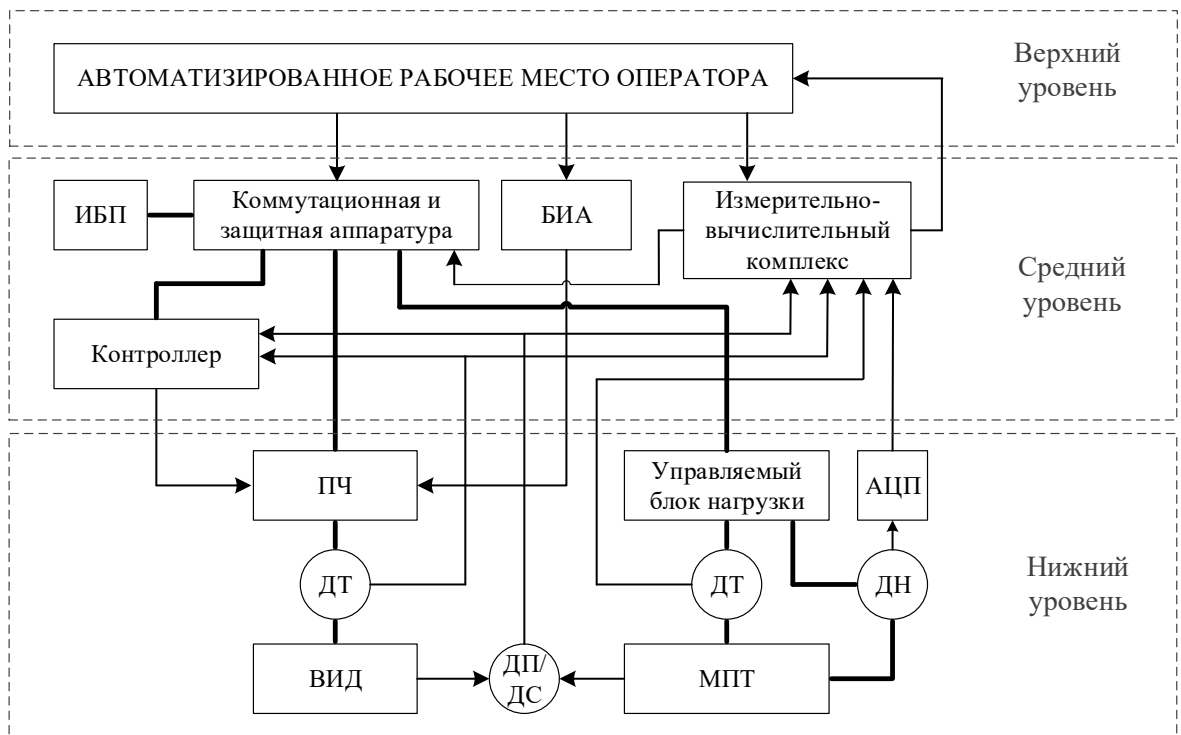


Рисунок 5.8. Иерархия уровней АСУ ТЭ.

Рассмотрим основные функции АСУ ТЭ по уровням.

Верхний уровень:

- управление включением питания;
- управление включением/выключением аварийных режимов работы; двигателя (выработка сигнала на блок БИА);
- настройка приборов, входящих в состав измерительно-вычислительного комплекса;
- визуализация хода технологического эксперимента в реальном масштабе времени на автоматизированном рабочем месте (АРМ);
- регистрация и обработка полученных данных и характеристик.

Средний уровень:

- обеспечение бесперебойного питания всех элементов системы через блок коммутации и защиты;

- имитация аварийных режимов работы электродвигателя через блок (БИА), выдача сигналов для перехода в аварийный/неполнофазный режим работы, отключение полумостов преобразователя частоты;
- Сбор сигналов с датчиков в блок измерений и вычислений
- Диагностика состояния системы при помощи датчиков тока и положения, оценка текущего состояния системы на случай аварийного превышения допустимых параметров.
- Формирование в контроллере алгоритмов управления для ключей преобразователя частоты.
- Передача данных верхнему уровню АСУ ТЭ.

Нижний уровень:

Измерение параметров электропривода

- Формирование напряжения для нагрузочной машины.

На рисунке 5.8. приведен общий алгоритм функционирования АСУ ТЭ.

Выводы по главе 5:

1. Разработана схема импульсного регулятора напряжения для вентильно-индукторного электропривода.
2. Разработана схема отказоустойчивого двухсекционного вентильно-индукторного электропривода.
3. Разработан лабораторный стенд для исследования работы вентильно-индукторного электропривода в рабочих и аварийных режимах.
4. Разработана автоматическая система управления технологическим экспериментом по исследованию отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода.

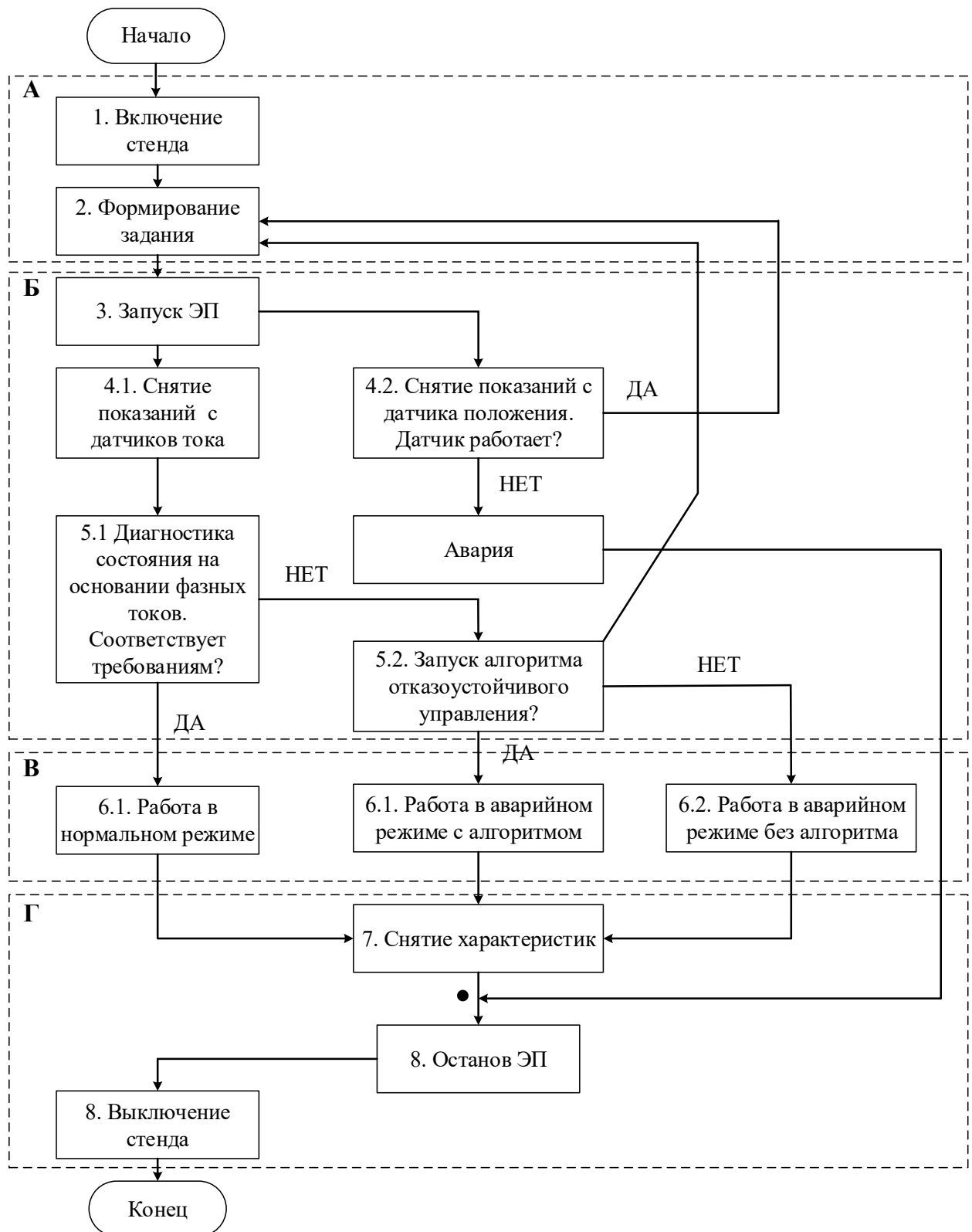


Рисунок 5.9. Общий алгоритм функционирования АСУ ТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Разработаны математическая и имитационная модели трехфазного вентильно-индукторного двигателя, позволяющие исследовать рабочие и аварийные режимы электропривода как в односекционном, так и двухсекционном исполнении. Разработаны математическая и имитационная модели электроцентробежного насоса добычи нефти, транспортного средства на базе вентильно-индукторного электродвигателя, позволяющие исследовать работу погружного насоса или транспортного средства в аварийных и неполнофазных рабочих режимах. Рассмотрен режим пуска на двух фазах.

2. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазным вентильно-индукторным электроприводом позволяющие базирясь на матрице отказов обеспечить отказоустойчивость и живучесть при одиночном и множественных отказах одной или нескольких фаз электродвигателя. Показано, что трехфазный вентильно-индукторный двигатель в аварийном двухфазном режиме обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью, проявляя свойство исходной отказоустойчивости с поддержанием частоты вращения на уровне 66%. Применение разработанных алгоритмов отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме трехфазного вентильно-индукторного электропривода с увеличением амплитуд фазных токов и изменением угла перекрытия фаз, а также совмещенного алгоритма позволяет поддержать частоту вращения на уровне 85–90% от значения до момента возникновения аварии. В однофазном режиме 33–66% в зависимости от алгоритма управления. Показано, что при работе с разработанным алгоритмом отказоустойчивого управления с увеличением амплитуд фазных токов реализуется возможность полного восстановления работоспособности установки электроцентробежного насоса с вентильно-индукторным электродвигателем. Показано, что в транспортном средстве при отказе одной фазы возможно восстановить заданную скорость транспортного средства

вплоть до 95% от начального значения при применении алгоритма управления трехфазным вентильно-индукторным двигателем с компенсацией момента за счет изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуд фазных токов. При обрыве второй фазы показано, что значение скорости падает до уровня 43% от начального.

3. Разработана математическая и имитационная модели бездатчикового четырехфазного вентильно-индукторного электропривода насосного агрегата в аварийных и неполнофазных режимах работы. Показано, что при использовании отказоустойчивого управления с переключением структуры и смещением векторов потока после обрыва одной фазы и перехода в 3-х фазный режим работы 4-х фазного вентильно-индукторного двигателя провал частоты вращения составляет 38% от номинального уровня, и двигатель продолжает устойчивое функционирование в аварийном режиме работы. При совместном использовании алгоритма бездатчикового управления и алгоритма компенсации момента за счет увеличения амплитуды фазных токов после отказа типа «обрыв фазы» электродвигателя работоспособность можно кратковременно восстановить до уровня 89 % от номинального заданного значения частоты вращения вала электродвигателя с минимальным снижением требуемого уровня объемного расхода жидкости, с дальнейшим переходом на длительный режим 62 % уровня от номинального без использования алгоритма компенсации токов

4. Разработаны технические решения по построению вентильно-индукторного двигателя с отказоустойчивым управлением при однократных и множественных отказах с обеспечением реализации в нем отказоустойчивых алгоритмов восстановления работоспособности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A.: Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive \ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. — P. 1-7
2. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes \ 2015 International Siberian conference on control and communications, SIBCON 2015 – proceedings. Издательство: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.-2015. — P. 7147192.
3. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes\ Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology. 2016 Издательство: Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск). — P. 140-144.
4. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A., Bukreev V.G. Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump [Electronic resources] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2019. — V. 330. — № 10. — P. 69-81.
5. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Algorithms of fault-tolerant sensorless vector control of switched-reluctance motor in electrical oil pump [Electronic resources] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2020. — V. 331. — № 5. — P. 208-218.
6. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы \ Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 138-143
7. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Восстановление работоспособности вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2014 - №. 4. - С. 181-184
8. Патент на ПМ № 128409 (RU), H02H 7/09, H02H 7/12, H02P 6/12, H02P 6 / 16. Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести / И.А. Розаев, Г.И., Однокопылов, В.Г. Букреев. – №2012153519; Заявл. 11.12.12; Оpubл.

20.05.13 Бюл. № 14.

9. Патент на ПМ № 128410 (RU), H02H 7/09, H02H 7/122, H02M 7/5395, H02P 27 / 08. Однофазный полумостовой инвертор для электродвигателя переменного тока с контролем состояния / И.А.Розаев., Г.И. Однокопылов, А.Д.Брагин,. -№ 2012153510; Заявл. 11.12.2012; Оpubл. 20.05.2013 Бюл. № 14.

10. Патент на ПМ № 128420 (RU), H02H 7/09, H02H 7/10, H02P 25/08. Однотактный импульсный регулятор напряжения для вентильно-индукторного электродвигателя / И.А. Розаев., Однокопылов Г.И, А.Д. Брагин. – № 2012153524; Заявл. 11.12.2012; Оpubл. 20.05.2013 Бюл. № 14.

11. Патент на ПМ № 136184 (RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя / И.А. Розаев, Г.И.Однокопылов, А.Д. Брагин. – № 2013138092; Заявл. 14.08.2013; Оpubл. 27.12.2013 Бюл. № 36.

12. Патент на ПМ № 136185 (RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильно-индукторного электропривода / И.А. Розаев, Г.И. Однокопылов., – № 2013138859; Заявл. 20.08.2013; Оpubл. 27.12.2013 Бюл. № 36.

13. Патент РФ на изобретение № 2657707, МПК В60К 6/28 (2007.10), В60L 11/00 (2006.01), H02K 21/00 (2006.01). Гибридное транспортное средство с вентильным двигателем. / И.А. Розаев., Г.И. Однокопылов., Е.П. Сенькив, Дементьев Ю.Н. Заявл. от 20.02.2017, Оpubл. 14.06.2018 Бюл. № 17

14. Розаев И.А., Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Моделирование вентильного двигателя в неполнофазных режимах работы // Международный научно-исследовательский журнал. - 2014 - №. 8-1(27). - С. 48-51

15. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод // Новейшие энергетические установки в промышленности и на транспорте. - 2014 - №. 1. - С. 39-42

16. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Принципы обеспечения отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом с обеспечением свойства живучести // Академический журнал Западной Сибири. - 2013 - Т. 9 - №. 6. - С. 46-47

17. Розаев И.А. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого управления двухсекционного вентильно-индукторного электропривода // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодёжного форума, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: Изд-во «Рауш_мбХ», 2014 - Т. 2 - С. 75-79
18. Розаев И.А. Диагностика двухсекционного вентильно-индукторного электропривода на основе анализа фазных токов // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодёжного форума, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: Изд-во «Рауш_мбХ», 2014 - Т. 2 - С. 79-82
19. Розаев И.А. Математическое моделирование вентильно-индукторного электродвигателя в аварийных режимах работы [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 259-260.
20. Розаев И.А. Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник XI Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 811-813.
21. Розаев И.А., Брагин А.Д. Fault-tolerant electric drives of industrial mechanisms \\\ Интеллектуальные энергосистемы: материалы I Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 21-25 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 210-213
22. Розаев И.А. Моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода \\\ Интеллектуальные энергосистемы: материалы I Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 21-25 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 214-218
23. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной научно-технической конференции, Томск, 9-11 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 229-235

24. Розаев И.А., Зарубин Н.А., Восстановление производительности карусельной упаковочной машины при отказе штуцеров // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: Раш мбх, 2014 - Т. 2 - С. 57-60

25. Rozaev I.A. Failure-free control of switched reluctance motor // Язык и мировая культура: взгляд молодых исследователей: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции: (часть 3), Томск, 24-28 Апреля 2013. - Томск: Изд-во ТПУ, 2013 - С. 85-89

26. Розаев И.А. Математическое моделирование многосекционного вентильно-индукторного электропривода // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 21-24 Ноября 2013. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013 - С. 82-86

27. Розаев И.А. Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: материалы отраслевой НТК, Северск, 27-31 Мая 2013. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013 - С. 75

28. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Исследование живучести трехфазного вентильно-индукторного электродвигателя // Электронные и электромеханические системы и устройства: тезисы докладов XIX научно-технической конференции, Томск, 16-17 Апреля 2015. - Томск: НПЦ "Полус", 2015 - С. 151-153

29. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Отказоустойчивое управления вентильно-индукторным электроприводом в аварийных режимах работы // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению SIBCON-2015, Омск, 21-23 Мая 2015. С 203-206.

30. Розаев И.А., Момот П.М. Электропривод буровых установок // Электроэнергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 2018 – С. 327.1-327.5

31. Розаев И.А., Паюк Л.А., Воронина Н.А. Применение колебательно-вращательного режима работы в виброприводе // Вестник ПГУ. Серия энергетическая / Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

(ПГУ) . — 2020 . — № 4 . — С. 314-323.

32. Однокопылов Г.И. Методы и алгоритмы отказоустойчивого управления электроприводами опасных производственных объектов // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.09.03. - Томск : Национально-исследовательский Томский Политехнический университет, 2017 г.

33. E.R. Laithwaite. Linear motors for high-speed vehicles // New Scientist. — 1963, — P. 802-805.

34. K.J. Binns and P.J. Lawrenson. Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems // Pergamon Press, 1963.

35. P.J. Lawrenson and L.A. Agu. Reluctance machines // IEE Electronics and Power Journal. — V. 10. Issue 8, — 1964, — P. 264-265.

36. Miller T. J. Switched reluctance motors and their control. — Oxford Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. — P. 205.

37. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели - М.: Издательство МЭИ, 2003 - 70 с.

38. Ясаков Г.С., Агафонов В.В., Костиков Е.А. Погружной Вентильно-индукторный электродвигатель открытого исполнения с универсальными подшипниками скольжения // Вестник Севастопольского национального технического университета. – 2012. - № 132. С. 50-53.

39. Васильев А.В. Вентильно-индукторный электропривод с автогенераторным управлением // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. - Казань : Казанский государственный технологический университет, 2005 г..

40. Патент РФ на изобретение № 2368059, МПК H02M5/40, H02K29/06, Устройство для питания вентильно-индукторного электродвигателя/ А.В. Сорокин, А.Н. Ремезов, Ю.И. Кочанов, Ю.А. Крылов, А.Л. Докукин - № 2007115180; заявлено 24.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г

41. Разработка и исследование мощного вентильно-индукторного электропривода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Корпусов Дмитрий Евгеньевич. – М., 2006. – 20 С.

42. Разработка энергоресурсосберегающих технологий в топливно-энергетическом хозяйстве города на основе современного электропривода: автореф. дис. ... докт.техн.наук: 05.09.03/Крылов Юрий Алексеевич.— М., 2008.— 40 С.
43. Вигриянов П.Г. Энергетические характеристики многофазного вентильного двигателя в нормальных и аварийных режимах // Всесоюзная научно-техническая конференция "Вентильные электромеханические системы с постоянными магнитами": Тез. Докл. — М., 1989. — С. 14.
44. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, К.А. Набатов, О.Г. Иванова. — М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. — 152С.
45. Крайнов Д.В. Алгоритмы и микропроцессорные системы управления: диссертация ... кандидата технических наук. — Новочеркасск, 2001. — 154 с.
46. Ивановский В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважных насосных установок для добычи нефти // Территория Нефтегаз. — 2007. — № 11. — С. 36-47.
47. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. - № 4. С. 55-64.
48. Птах Г.К., Цветков А.А., Квятковский И.А., Протасов Д.А., Рожков Д.В. Вентильно-индукторный электропривод для насоса ГРАТ-1800/67 // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. — 2010. - №3. С. 227-231.
49. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления // Нефтегазовое дело. — 2012. — № 5. —С. 31-46.
50. Козаченко В. Ф., Остриров В. Н., Русаков А. М. Перспективные системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением // Доклады научно-практического семинара «Электропривод экскаваторов». М.: ИздательствоМЭИ. 2004. — С. 1–8.
51. Реализация предельных характеристик в тяговом электроприводе / М.М. Григорьев, А.Н. Шишков, Д.А. Сычев и др. // Фундамент. и приклад.

исследования в современном мире. – 2015. – № 10. – С. 17–22.

52. Аналитическое моделирование тяговой характеристики электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Н. Мифтахова // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2014. – № 7. – С. 107–112

53. Королев В.В. Вентильно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: Междунар. научно-техн. Конф. ААИ. посв. 145-летию МГТУ «МАМИ». – Тольяти, 2010. – С. 3. – 54 с.

54. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ Acta Polytechnica Hungarica. №1, 2010.

55. Multiphysics NVH modeling: simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle / F.L.M. dos Santos, J. Anthonis, F. Naclerio, H. van Der Auweraer, J.J.C. Gyselinck, L.C.S. Góes // IEEE transactions on industrial electronics. – 2014. – V. 61. – № 1. – P. 469–476.

56. Laskaris, K.I., Kladas, A.G. Internal permanent magnet motor design for electric vehicle drive // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – V. 57. – P. 138-145.

57. Рябов Е.С. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 57. – С. 243–251.

58. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: Сетевой электронный научный журнал. – 2015. Т. 2. - № 3. С. 23-33.

59. Шевчук В.А., Муравлев О.П. Анализ вероятности безотказной работы электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 4 (138). — С. 39–46.

60. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых

производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

61. Антипов, С.И. Современные испытательные циклы и их актуальность при создании алгоритма работы системы управления автомобиля с КЭУ / С.И. Антипов, Ю.В. Дементьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2013. – № 10 (113). – С. 8–11.

62. А.Н. Ремезов. Опыт внедрения вентильно-индукторных электроприводов на объектах ОАО «МОЭК» с целью повышения надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», 2010 г., МЭИ

63. Д.И. Алямкин. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения [Конференция] // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. - Москва : Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2011.

64. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С. Принцип построения отказоустойчивой системы управления асинхронным электроприводом // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 321. — № 5. — С. 105–109.

65. Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. // Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.

66. Дроздов А.В. Разработка системы бездатчикового векторного управления вентильно-индукторным двигателем с независимым возбуждением: автореф. канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2008.

67. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production [Electronic resources] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. — 2017. — V. 328. — №1. — P. 123-131.

68. Павлов Д.О., Кузнецов Е.М. Бездатчиковое определение скорости в электроприводе установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы

энергетики. – Омск: Изд-во Омского государственного технического университета, 2016. – С. 147–153.

69. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Sa'ndor Hala'sz // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.

70. Чавылалов М.В. Бездатчиковое определение положения ротора в системе управления вентильно-индукторного электропривода: дис. ... канд. тех. наук. – Ростов-на-Дону, 2013. – 115 с.

71. Фукалов Р.В. Разработка универсальной модульной бездатчиковой системы управления вентильно-индукторного электропривода// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. - Москва : Московский энергетический институт, 2005 г..

72. Вдовин В.В., Котин Д.А., Панкратов В.В. Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 23–27.

73. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 92–97.

74. Бычков М.Г., Красовский А.Б. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода при бездатчиковом варианте управления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № S2. – С. 5–17.

75. Браун М., Раутани Дж., Пэтил Д. Диагностика и поиск неисправностей электрооборудования и цепей управления. – М.: Изд. «Додэка - XXI», 2007. – 328 с.: ил. (Серия «Силовая электроника»).

76. Надежность в технических системах. Справочник / Под ред. И.Н.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 606 С.

77. Odnokopylov G. I., Bragin A. D. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2014 — V. 66. — №. 1. — P. 1-6.
78. Odnokopylov G. I. , Bragin A. D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — V. 698. — P. 24-29.
79. Odnokopylov G. I. , Bragin A. D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : Proc. May 21-23, 2015. — Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section. — Omsk, 2015. — P. 1-5.
80. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. — 155 с.
81. Шевкунова А.В., Кашуба А.В. Усовершенствование алгоритма проектирования вентильно-индукторных машин // Вестник чувашского университета. – 2021. - № 3. С. 140-155.
82. Котин Д.А., Панкратов В.В. Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 4. – С. 46–51.
83. Нос О.В., Волков В.Ю., Клан В.А. Векторное управление электроприводом переменного тока с многоуровневым преобразователем частоты на базе n-мостов // Электротехника. – 2019. – Т. 90. – № 4. – С. 304–309.
84. Пахомин С.А. Развитие теории и практика проектирования, энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: дис. д-ра техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001.
85. Однокопылов Г.И., Шевчук В.А., Дементьев Ю.Н. Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 131–140.
86. Eremochkin, S.Y., Dorokhov, D.V. Characteristics Research of the

Semiconductor Frequency Converter in Matlab Simulink // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021. – 2021. – P. 144–149

87. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

88. Темирёв А.П. Математическое моделирование, проектирование и экспериментальное определение параметров вентильно-индукторных электроприводов: Монография. —Новочеркасск: ЛИК. — 2011. — С. 794.

89. Нгуен Куанг Кхоа. Методика моделирования вентильно-индукторных двигателей с помощью программ Elcut и MatlabSimulink // Изв. вузов. Электромеханика. — 2016. —№ 2. — С. 73-79.

90. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. — 288 с.

91. Электрический привод: учебно-методическое пособие / А.Ю. Чернышев, С.И. Качин, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет, – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 156с.

92. Schramm, A. Gerling, D. «Evaluation and Comparison of Fault Tolerant Switched Reluctance Machines for a Specific Application» Universität der Bundeswehr München Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (EIT), 2009.

93. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. BocaRaton: CRCPress, 2001.

94. Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement (COTA) Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, TK 2787 .R35 2001, ISBN 0 -8493-0838-0

95. D. Gerling, and A. Schramm. Evaluation and Comparison of Fault Tolerant Switched Reluctance Machines for a Specific Application, in Proc. of the 9

Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE), Marbella (Spain), 2005.

96. Ruba, M., Anders, M., "Fault Tolerant Switched Reluctance Machine Study," Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM '2008), Nürnberg (Germany), 2008

97. Mir, S., Islam, M.S. Sebastian, T. Husain, I. Delphi Corp., Saginaw, MI, USA. Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller. Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:19 , Issue: 2). 2004

98. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011.

99. Yang, Q., Wang, R., Ma, M., Yang, S., Zhang, X. A fault tolerant switched reluctance motor drive for electric vehicles under multi-switches open-fault conditions // Microelectronics Reliability. – 2020. – V. 114. – № 113761

100. Ma, M., Wang, R., Li, F., Wang, J., Yang, S. A fault-tolerant control strategy for switched reluctance motor drive for electric vehicles under short-fault condition // Microelectronics Reliability. – 2018. – V. 88. – P. 1221–1225.

101. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual reviews in control. – 2008. – V. 32. – № 2. – P. 229–252.

102. Sheth N.K., Sekharbabu A.R.C., Rajagopal K.R. Effects of inter-turn fault in phase winding on the performance of multi-phase doubly salient motors // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2006. – V. 304. – № 1. – P. 207–209.

103. Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of Switched-reluctance motors for the desired torque profile. Structural and multidisciplinary optimization. – 2010. – V. 42. – № 5. – P. 783–796.

104. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Iss. 15. – № 6. – P. 1029–1044.

105. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques. – NY: Springer, 2003. – 282 p.

106. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine /

C.J. Bateman, B.C. Mecrow, P.P. Acarnley, A.C. Clothier, N.D. Tuftnell // IEEE transactions on industry applications. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 2329–2337.

107. Torque-ripple minimization for switched reluctance motor based on torque sharing function by fuzzy variable angle strategy / Z. Liu, J. Wang, X. Song, J. Tang, Y. Yang // ICIC express letters. – 2017. – V. 11. – № 1. – P. 161–168.

108. Adaptive state observers for sensorless control of switched reluctance motors / R. Ortega, A. Sarr, I. Bahri, D. Diallo, A. Bobtsov // International journal of robust and nonlinear control. – 2019. – V. 29. – № 4. – P. 990–1006.

109. Senthil Murugan L., Maruthupandi P. Sensorless speed control of 6/4-pole switched reluctance motor with ANFIS and fuzzy-PID-based hybrid observer // Electrical Engineering. – 2020. DOI: 10.1007/s00202-019-00915-5

110. Wajdi Z., Jalel K., Habib R. Comparative design and modeling study of single sided linear planner switched reluctance motor // WSEAS transactions on circuits and systems. – 2014. – V. 13. – P. 37–46.

111. Ganji B., Askari M.H. Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method // AEJ – Alexandria engineering journal. – 2016. – V. 55. – № 3. – P. 2531–2538.

112. Petrushin A., Tchavychalov M. Improving the accuracy of switched reluctance motor sensorless rotor position estimation // Journal of engineering and applied sciences. – 2015. – V. 10. – № 4. – P. 80–84.

113. Nos O.V., Starostina L.V., Radel U. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control // 18th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2017. – P. 511–515.

114. Chiba, A., Kiyota, K. Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle // Proceedings - 2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2015. – 2015. – № 7194520. – P. 127–131.

115. Копылов И.П., Фрумин В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 С.

116. Гришенцев А.Ю. Теория и практика технического и технологического

эксперимента /учебное пособие.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.–102 с.

117. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.

118. Российский рынок нефтесервисных услуг 2014. Аналитический обзор / под ред. Е. М. Миролубовой. — М.: РБК, 2014. — 218 с.

119. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 213 С.

120. Popov M.M., Maniv O. Simulation of an autonomous power supply system based on lithium-iron-phosphate (LIFEPO₄) // MATEC web of conferences: 5th International Youth Forum "Smart Grids 2017": proceedings. — Tomsk, 2017. EDP Sciences. — 2017. — P. 01060. — DOI: 10.1051/matecconf/201714101060

121. Александровский С.В. Петренко Ю.Н. Разработка математической и имитационной модели вентильно-индукторного двигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — Минск : Белорусский национальный технический университет, 2011. — № 2. — С. 15-22.

122. Shul'gina Y.V., Kostina M.A., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V. Investigating Measurement Errors in Dual-Frequency Probing Technique by Mathematical Modeling // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2019. – V. 55. — №. 1. — P. 15-21.

123. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Комплекс математических моделей для синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16. — № 8(53). — С. 36-44.

124. Evstratov A., Zavyalov V., Grigoryev A., Semykina I. A new torque control system of permanent magnet synchronous motor // MATEC web of conferences: 4th International Youth Forum "Smart Grids 2016": proceedings, Tomsk, October 10-14, 2016. EDP Sciences, — 2016. — P. 01046. — DOI: 10.1051/matecconf/20179101046

125. Ларченко Л.В. Нефтегазовая отрасль России: современное состояние и направления развития в условиях неопределенности // Общество. Среда. Развитие. — 2019. – № 1. – С. 9–13.

126. Козаченко В. Ф., Остриров В. Н., Русаков А. М. Перспективные системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением // Доклады научно-практического семинара

«Электропривод экскаваторов». М.: Издательство МЭИ. 2004. – С. 1–8.

127. Проблемы анализа технического состояния современных приводов компрессорных установок магистральных газопроводов / П.С. Кунина, Е.И. Величко, М.С. Степанов, А.В. Музыкантова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 3. – С. 56–58.

128. И.А. Рябинин. Логико-вероятностный анализ проблем надежности, живучести и безопасности // Новочеркасск, ЛИК, 2009. – 600 С.

129. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Speed control of sensorless induction motor drive based on model predictive control // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Novosibirsk, 2013. – P. 269–274.

130. Verbytskyi, I., Bondarenko, O., Lukianov, M., Zhuikov, V., Pires, V.F. High frequency modular electric drive for switched reluctance motor with reduced torque ripple // 6th IEEE International Energy Conference, ENERGYCon 2020. – 2020 – № 9236601. – P. 170–175

131. Ma, M., Wang, R., Yang, S., Li, F. Fault analysis of power converter with switched reluctance motor for electric vehicles // The 16th Annual Academic Conference of the Power Electronics Society of China Electrotechnical Society, China. – 2018

132. Gan, C., Chen, Y., Qu, R., Kong, W., Hu, Y. An Overview of Fault-Diagnosis and Fault-Tolerance Techniques for Switched Reluctance Machine Systems // IEEE Access – 2019. – V. 7. – № 8917628. – P. 174822–174838.

133. Mohammed, A., Melecio, J.I., Djurović, Š. Open-Circuit Fault Detection in Stranded PMSM Windings Using Embedded FBG Thermal Sensors // IEEE Sensors Journal. – 2019. – V. 19. – № 8631134. – P. 3358–3367.

134. Чернышев А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: машиностроение. –

2018. –Т. 18 – № 1. – С. 5–16.

135. Kolpakhchyan P., Kochin A., Lobov. B., Peregudov O. A. Mathematical model of switched-reluctance motor drive for electrical spindle in synthetic yarn machine// XV International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". – 2019 – P. 0 250.

136. Pat. 5323093 (США), Int.Cl. H02K 23/00. Brushless motor driving device / Kikuchi Atsushi.– Оpubл. 21.6.94.12027

137. Rechnergestützte Prüf- und Diagno- severfahren für Vorschubsantriebe / Weselow O., Chrapko P. // 11. Int. Fachtag. «Ind Autom.- Autom. Antriebe» Chemnitz, 12–14 Febr., 1991. – Chemnitz, 1991. – С. Р 15/1 – Р 15/4.

138. Pat. 5446354 (США), Int.Cl.H01R 39/46. Drive apparatus for brushless dc motor and failure diagnosing method for the same / Hiruma Atsuyuki. – Оpubл. 29.8.95.

139. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, К.А. Набатов, О.Г. Иванова. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 152С.

140. Интеллектуальный электропривод на основе вентильного двигателя для запорной арматуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шабуров Павел Олегович. – Челябинск, 2009. – 18 С.

141. De Paula M.V., Dos Santos Barros T.A. A new flux linkage estimation with drift cancellation technique for switched reluctance machines // Electronics (Switzerland) – 2020. – V. 9. – № 3. – P. 405.

142. Романовский В.В., Никифоров Б.В., Макаров А.М. Разработка гребного вентильно-индукторного двигателя для систем электродвижения большой мощности // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. – 2019. –Т. 11 – № 2. – С. 357–366.

143. Petrushin A.,Smachney V.,Petrushin D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies// IOP conference series: materials science and engineering "Advanced Problems of Electrotechnology" – 2020 – P. 012028.

Приложение А. Акт внедрения «Мехатроника-Софт»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «МЕХАТРОНИКА-СОФТ»

г. Томск ул. Ивана Черных 85, кв. 37. Тел.+7-3822-97-71-82, моб.: 8-905-992-0409

ИНН/КПП: 7017259460 / 701701001

Р/с.: 40702810623500000398 в ФИЛИАЛ "НОВОСИБИРСКИЙ" АО "АЛЬФА-БАНК"

Кор.счет:30101810600000000774 БИК банка: 045004774

E-Mail: lsw777@mail.ru

АКТ

от « 12 » ноября 2020 г.

О внедрении результатов диссертационной работы «Алгоритмы отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом производственных объектов» на соискание ученой степени кандидата технических наук сотрудника Национального исследовательского Томского политехнического университета

Розаева Ивана Андреевича

Комиссия в составе представителей ООО «Мехатроника-Софт» директора к.т.н. Ляпушкина С.В. и технического директора к.т.н. Каракулова А.С. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы ассистента НИ ТПУ ИШЭ Розаева И.А. «Алгоритмы отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом производственных объектов» по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук используются для обеспечения эксплуатационной живучести и повышения рабочего ресурса комплексов с исполнительным вентильно-индукторным электродвигателем за счет использования отказоустойчивого алгоритмического управления.

Были внедрены следующие положения диссертации:

1. Алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазным вентильно-индукторным электроприводом позволяющие базирясь на матрице отказов обеспечить отказоустойчивость и живучесть при одиночном и множественных отказах одной или нескольких фаз электродвигателя.
2. Алгоритм бездатчикового отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электродвигателем в аварийных и неполнофазных режимах работы.

Директор
ООО «Мехатроника-Софт»,
канд.техн. наук



Ляпушкин С.В.

Приложение Б. Акт внедрения ОЭЭ ИШЭ ТПУ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШЭ ТПУ, к. т. н., доцент

А.С. Матвеев

« » 2019 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Розаева Ивана Андреевича

Комиссия в составе:

председатель: руководитель отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., доцент, Ивашутенко А.С. Члены комиссии: начальник организационного отдела инженерной школы энергетики ТПУ, к.т.н., Лукутин А.В., доцент отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., Кладиев С.Н. Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы ассистента ИШЭ Розаева И.А. «Алгоритмы отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом объектов промышленной безопасности», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы, используются в учебном процессе Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики в методических материалах дисциплины: «Электрический привод» студентами направления ООП 13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника», а также при подготовке магистерских диссертаций студентами ТПУ.

Председатель комиссии:

Руководитель ОЭЭ ИШЭ

Члены комиссии:

Начальник организационного отдела ИШЭ

Доцент ОЭЭ ИШЭ

А.С. Ивашутенко

А.В. Лукутин

С.Н. Кладиев

Приложение В. Медаль РАН

