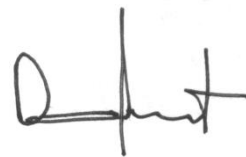


На правах рукописи



ОДНОКОПЫЛОВ ГЕОРГИЙ ИВАНОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ОПАСНЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный консультант:

Букреев Виктор Григорьевич доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Пантелеев Василий Иванович доктор технических наук, профессор, директор Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой «Электротехнических комплексов и систем» (г. Красноярск);

Ефимов Александр Андреевич доктор технических наук, профессор кафедры «Управление в технических системах» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (г. Санкт-Петербург);

Вигриянов Павел Георгиевич доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудования и автоматизации производственных процессов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) филиал в г. Златоусте (г. Златоуст).

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск).

Защита диссертации состоится:

25 октября 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д.7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться:

В библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ул. Белинского, 55) и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>.

Автореферат разослан: «10» сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д212.269.11,
канд. техн. наук, доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для важных критических технологий и опасных производственных объектов (ОПО) существует необходимость предотвращения техногенных аварий и минимизации невосполнимых экономических потерь. Требования безопасности функционирования и ограничения рисков нежелательных режимов при эксплуатации ядерных, химических, строительных, металлургических и других объектов являются определяющими факторами в критериях живучести основного технологического оборудования. Юридической основой обеспечения промышленной безопасности во многих отраслях служит Постановление Правительства Российской Федерации от 28 марта 2001 г. N 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» (с изменениями от 1 февраля 2005 г. и 22 апреля 2009 г.). Так, при производстве оборонной продукции существуют неукоснительные условия выполнения технологических процессов при создании изделий: «особо ответственный технологический процесс, как технологический процесс, нарушение в котором может привести к выходу из строя оборонной продукции или к изменению (потере) ее функциональных свойств» (ГОСТ РВ15.002–2003).

Большинство производственных объектов имеют в своем составе оборудование с электроприводами переменного тока (ЭПТ), отказы которых приводят к невозможности исполнения рабочих функций необслуживаемых механизмов в процессах с длительным или безостановочным циклом обработки продукции. В настоящее время особое внимание уделяется живучести ЭПТ в подъемно-транспортных комплексах перемещения потенциально опасных грузов, нефти и газо-продуктов, ракетных и авиационных системах. Примером нормативного документа, в котором конкретизируются основные положения развития таких комплексов, может служить распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 N 1662-р (ред. от 08.08.2009) «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года», где определено увеличение потребности в грузоподъемной и транспортной технике с высокой степенью безотказной работы.

В современных подъемно-транспортных комплексах широко используются цифровые ЭПТ вращательного или поступательного движения, где в качестве исполнительных двигателей применяются асинхронные (АД), вентильные (ВД) и вентильно-индукторные (ВИД) электродвигатели различного исполнения. При решении задач обеспечения эксплуатационной живучести таких комплексов значительно возрастает роль методов и алгоритмов отказоустойчивого управления силовыми импульсными преобразователями и исполнительными двигателями ЭПТ, как основных элементов электромеханической системы.

Фундаментальные теоретические вопросы построения технических систем (ТС) со свойством живучести рассмотрены в работах Ю.И. Стекольников, Г.Н. Черкесова, Ю.Ю. Громова и другими, зарубежными учеными: С.Л. Colbourn (США), К. Sekine, Н. Imai, S. Tani (Япония). В тоже время конкретные решения отказоустойчивых ЭПТ исследовались такими российскими учеными, как: В.К.Лозенко, С.Г.Ворониным, П.Г. Вигрияновым, П.О. Шабуровым, В.М. Сандаловым, В.Ф. Козаченко, В.Н. Острировым, Д.Е. Корпусовым, Д.И. Алямкиным, О.П. Муравлевым, Д.М. Глуховым и другими, зарубежными учеными: А.А. Marques Cardoso, Andre M.S.Mendes (Португалия), Michele Dai Pre, Marco Zordan, Silveroio Bolognani (Италия), Cursino Brandao Jacobina, Edison Roberto Cabralda Silva, Antonio Marcus Nogueira Lima, Ricardo Luciode

AraujoRobeiro (Бразилия), Johannes Zentner, RolfIsermann (ФРГ), Sangshin Kwan, Hamid A. Toliyat, Thomas A. Lipo, Thomas M. Jahns, Jen-Ren Fu, Brian A. Welchko (США).

Несмотря на имеющиеся теоретические подходы, используемые для восстановления работоспособности электроприводов (ЭП) различных механизмов, имеется ряд нерешенных проблем, связанных с особенностями работы двигателей переменного тока в аварийных и неполнофазных режимах, сложностью построения нелинейных математических моделей электродвигателей переменного тока и импульсного преобразователя напряжения, реализацией методов и алгоритмов восстановления работоспособности цифровых электроприводов высокоответственных механизмов в реальном времени протекания динамических процессов.

Все это определяет актуальность создания эффективных методов и алгоритмов отказоустойчивого управления ЭПТ с микроконтроллерными устройствами обработки информации для мониторинга и восстановления работоспособности электромеханической системы, являющейся неотъемлемой частью оборудования опасных производств и технологий.

В диссертационной работе поставлена важная **научно-техническая проблема** обеспечения эксплуатационной живучести электроприводов переменного тока, используемых в составе оборудования опасных производственных объектов.

Объект исследований: частотно-регулируемые электроприводы переменного тока с ограниченными информационными и вычислительными ресурсами их микропроцессорных систем управления.

Предмет исследований: математическое и алгоритмическое обеспечение, структурные и схмотехнические решения цифровых электроприводов переменного тока.

Цель работы: повышение функциональной работоспособности электроприводов переменного тока в аварийных режимах работы силового преобразователя, исполнительного двигателя и механической нагрузки.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Анализ и систематизация известных способов и устройств обеспечения отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока.
2. Разработка методов отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока в аварийных режимах работы исполнительных двигателей опасных производственных объектов.
3. Создание математических моделей электроприводов переменного тока в аварийных режимах работы исполнительных двигателей.
4. Формализация записи алгоритмов восстановления работоспособности электроприводов переменного тока с интегрированными битами матриц одиночных и множественных отказов.
5. Исследование алгоритмов отказоустойчивого управления с полным или частичным восстановлением работоспособности трехфазных электроприводов переменного тока с однократными отказами.
6. Разработка алгоритмов отказоустойчивого управления с полным или частичным восстановлением работоспособности трехфазных секционированных и m -фазных электроприводов с множественными отказами.
7. Исследование процесса адаптации структуры электропривода к последствиям отказов при алгоритмическом восстановлении работоспособности.
8. Разработка схмотехнических решений систем управления электроприводов переменного тока с отказоустойчивым управлением при наличии однократных и

множественных отказов и программно-аппаратной реализацией отказоустойчивых алгоритмов восстановления работоспособности.

Методы исследования. В диссертационной работе применены: теория электропривода и электрических машин, методы описания динамических процессов электромеханического преобразования энергии, математическое моделирование и программирование в среде Delphi и Matlab, метод коммутационных разрывных функций и спектральный метод анализа сигналов. Проверка теоретических исследований осуществлялась на лабораторном испытательном стенде и регистрацией данных сертифицированным информационно-измерительным комплексом (ИВК) МІС-300, тестовыми испытаниями на работающем оборудовании.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методы отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока в аварийных режимах исполнительных двигателей опасных производственных объектов.

2. Математические модели электроприводов переменного тока в штатных и аварийных режимах работы.

3. Форма записи алгоритмов восстановления работоспособности электроприводов переменного тока с интегрированными битами матрицы отказов.

4. Алгоритмы отказоустойчивого управления с полным или частичным восстановлением работоспособности трехфазных электроприводов переменного тока с однократными отказами.

5. Алгоритмы отказоустойчивого управления с полным или частичным восстановлением работоспособности трехфазных секционированных вентильно-индукторных и многофазных асинхронных электроприводов с множественными отказами.

6. Структуры и схемотехнические решения электроприводов переменного тока с отказоустойчивым управлением при наличии однократных и множественных отказов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректным применением математических методов и моделей, адекватность которых реальным процессам подтверждена результатами экспериментальных исследований; сходимостью результатов, полученных теоретически и экспериментально; применением современного сертифицированного измерительного оборудования (ИВК МІС-300); согласованностью результатов исследований с данными других ученых.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны методы отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока, позволяющие оценить их работоспособность в аварийном режиме и реализовать структурную адаптацию силовых цепей преобразователя частоты к последствиям отказов исполнительных двигателей опасных производственных объектов.

2. Созданы математические и имитационные модели электроприводов переменного тока в аварийных и неполнофазных режимах работы, позволяющие на основе мониторинга в реальном времени формировать матрицы отказов и обеспечивать последующее полное или частичное восстановление работоспособности электроприводов с учетом конфигурации схем подключения двигателей со связанными или развязанными фазами с круговым и эллиптическим вращающимися магнитными полями.

3. Формализованы выражения самоорганизации управления с интегрированными битами матрицы отказов для алгоритмов восстановления работоспособности электроприводов переменного тока, позволяющие обеспечить структурную адаптацию силовых цепей преобразователя частоты к последствиям отказов в реальном времени.

4. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления с частичным или полным восстановлением работоспособности трехфазных асинхронных, вентильно-индукторных и вентильных электроприводов, позволяющие обеспечить купирование однократных отказов.

5. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления с частичным или полным восстановлением работоспособности трехфазных секционированных вентильно-индукторных электроприводов (ВИП), позволяющие обеспечить купирование однократных и множественных отказов.

6. Предложены технические решения по реализации метода отказоустойчивого управления электроприводами (ЭП) переменного тока с асинхронными, вентильными и вентильно-индукторными двигателями. Разработаны технические решения по построению отказоустойчивых структур асинхронных и вентильных электроприводов, выполненных на мостовых и полумостовых преобразовательных ячейках, отличающиеся применением защитных элементов блокирования отказа, расположенных в звене постоянного и переменного тока, с подключаемыми резервными полумостами, для схемных решений со связанными и развязанными фазами двигателя. Предложены технические решения отказоустойчивого вентильно-индукторного двухсекционного электропривода отличающиеся повышенной живучестью при одиночных и множественных отказах.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления трехфазными ВД, АД и ВИП в аварийных и неполнофазных режимах и схемотехнические реализации ЭПТ [28–33, 35–37, 42–57], позволяющие полностью или частично восстановить его работоспособность в аварийных режимах работы с обеспечением свойства живучести двигателя и силового преобразователя частоты.

2. Разработаны способы управления и устройства по реализации отказоустойчивых ограничителей грузоподъемности на основе косвенных методов измерения массы поднимаемого груза и мажоритарного резервирования [34, 38–41], позволяющие обеспечить безопасность и живучесть кранового ЭПТ механизма подъема.

3. Разработаны способы диагностики и мониторинга фундаментов ЭПТ насосных агрегатов с оценкой величины остаточного ресурса фундамента [58, 59], позволяющие увеличить рабочий ресурс насосного агрегата не менее чем на 14 % в процессе безопасной эксплуатации электропривода.

4. Разработаны программные продукты «Программа расчета переходных процессов кранового АЭП с ограничителем грузоподъемности» и «Программа расчета переходных процессов АЭП в неполнофазных и аварийных режимах работы» [62–64], позволяющие оценить работоспособность кранового ЭПТ механизма подъема с ограничителем грузоподъемности в рабочих и аварийных режимах.

Личный вклад автора. 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 [7, 9–10, 11] разработаны и сформулированы принципы отказоустойчивого управления, в публикациях [1–6, 8, 12–25, 27] – математические моде-

ли отказоустойчивых электроприводов, методы и алгоритмы восстановления работоспособности ЭПТ, в публикациях [28–60] – технические решения по реализации отказоустойчивого управления ЭПТ. Автор непосредственно участвовал в разработке программных и аппаратных средств, математических моделей, в проведении и анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

– В Институте электрических машин, приводов и дорог Технического университета Брауншвайга (Technische Universität Braunschweig Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen) применены для научно-исследовательских целей: разработанная методика обеспечения свойства живучести трехфазного ВД в аварийном двухфазном режиме на основе способа обеспечения живучести трехфазного вентильного двигателя [36] и устройства реализации способа на основе вентильного электропривода со свойством живучести [33]; методика обеспечения свойства живучести трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме на основе способа управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя [37] и устройство реализации способа на основе асинхронного электропривода со свойством живучести [35].

– На предприятии ОАО «Новосибирский завод им. Коминтерна» (г. Новосибирск) внедрена методика повышения надежности ВД, обеспечивающая работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного синхронного двигателя с позиционной модуляцией.

– На предприятиях: ООО «Тепромес», НТЦ Промбезопасность-ТГАСУ (г. Томск) внедрены «Программа расчета переходных процессов кранового АЭП с ограничителем грузоподъемности» [62] и «Программа расчета переходных процессов асинхронного электропривода в неполнофазных и аварийных режимах работы» [64].

– В учебном процессе кафедр «Электропривода и электрооборудования» Национального исследовательского Томского политехнического университета, «Общая электротехника и автоматика» и «Строительные и дорожные машины» Томского государственного архитектурно-строительного университета используется разработанное программное обеспечение: «Программа расчета переходных процессов асинхронного электропривода в неполнофазных и аварийных режимах работы» [64], «Программа расчета переходных процессов вентильного электропривода» [63] и «Программа расчета переходных процессов кранового асинхронного электропривода с ограничителем грузоподъемности» [62].

– На предприятии ТНПВСЭП Томск СЭП внедрена методика оценки фундаментов электроприводов насосных агрегатов на основе способов компьютерной диагностики и мониторинга [58, 59].

– В НИИ автоматике и электромеханике (г. Томск) внедрена опытная серия блоков вентильного электропривода с поддержкой работоспособности в аварийном двухфазном режиме [30]. В разработке используются самозащищенные силовые ключи с бесконтактным датчиком тока [28].

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 трехфазных асинхронных, вентильных и вентильно-индукторных электроприводов; в соответствии с пунктом 4 – исследовать работоспособность и оценить качество функционирования трехфазных асинхронных,

вентильных и вентильно-индукторных электроприводов при отказах силовых цепей с восстановлением полной или частичной работоспособности.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались: на V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2007», Санкт-Петербург, 2007г.; на IV Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2009г.; на IX сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов», Санкт-Петербург, 2009г.; на научном семинаре стипендиатов программ «Михаил Ломоносов II» и «Иммануил Кант» 2008/2009 г Москва, 2009г.; на VIII симпозиуме «Линейный электропривод для промышленности», Эйндховен (ФРГ), июль 3-6, 2011г.; на XVI Международной заочной научно-технической конференции «Технические науки – от теории к практике», Новосибирск, 2012г.; на XIV Международной научно-технической конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта, 2012г.; на научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», ОАО «НПЦ "Полус"», Томск, 2013г., 2015г.; на I Международной научно-технической конференции «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», Йошкар-Ола, 2013г.; на VI Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2013 г.; на Международной научно-технической конференции «Науки о Земле: современное состояние и приоритеты развития», Дубай (ОАЭ), 2013г.; на XXX заочной научной конференции Research Journal of International Studies, Екатеринбург, 2014г., на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 2015г., на научно-технических семинарах энергетического института ТПУ, Томск, 2011-2016 гг. и кафедр АиЭ и СДМ ТГАСУ, Томск, 2011-2016 гг.

Научные исследования выполнялись в рамках: программы «Развитие научного потенциала высшей школы»; г/б договора на выполнение НИОТКР № 109-12/НИОТКР от 3 ноября 2012г.; г/б темы № 01201458700 по приоритетному направлению: перспективные виды вооружений и специальной техники; х/д между ОАО «Гипроспецгаз» г. Москва и ГОУ ВПО ТГАСУ по оценке технического состояния строительных конструкций ГКС газопровода НВПЗ-ПАРАБЕЛЬ-КУЗБАСС, хозяйственных работ х/д 122/85Б (1983–1985 гг), х/д 121/87 (1987–1989 гг) НИИАЭМ при ТУСУР.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 64-х научных работах, в том числе в 20-ти статьях, входящих в перечень ВАК для докторских диссертаций, 37 патентах РФ на изобретения и полезные модели, 6-ти статьях в изданиях Scopus и одной монографии. Получено 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, семь глав, заключение, список используемой литературы из 257-ми наименований. Объем диссертации составляет 343 с., включая 144 рис., 20 таблиц, приложений на 10 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи работы, приведены научная новизна полученных

результатов и практическая значимость выполненной работы, выделены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ аварийных режимов и методов обеспечения отказоустойчивости технических объектов (ТО) и систем электромеханики с обеспечением свойства живучести и определены направления их совершенствования.

Для ЭПТ в составе ОПО (рис. 1) экономически целесообразно с целью снижения рисков техногенных аварий, катастроф и предотвращения ущерба применение отказоустойчивого управления с обеспечением свойства живучести.



Рис. 1. Области применения ЭПТ в составе опасных производственных объектов

Согласно тенденциям развития техники и нормирования технических систем (ТС) начиная с 1980 г. произошел переход от категории «надежность» к категориям объектов потенциальной опасности – «безопасности» и «живучести», а с 2010 г. – к обеспечению «риска» и «защищенности». Свойство ТС сохранять способность к функционированию при отказах элементов определяется термином «отказоустойчивость». Как и надежность, отказоустойчивость определяется для нормативных (расчетных) воздействий, однако при нерасчетных и сверхнормативных воздействиях состояние ТО определяется свойством живучести, включающим в себя режим ограниченной функциональности ТО. Для ЭПТ это состояние может быть определено свойством ограниченной работоспособности с меньшими по сравнению с номинальными значениями момента и частоты вращения двигателя. Известные способы и устройства обеспечения отказоустойчивости АД, ВИП, ВД представлены на рис. 2 [4, 7, 9].

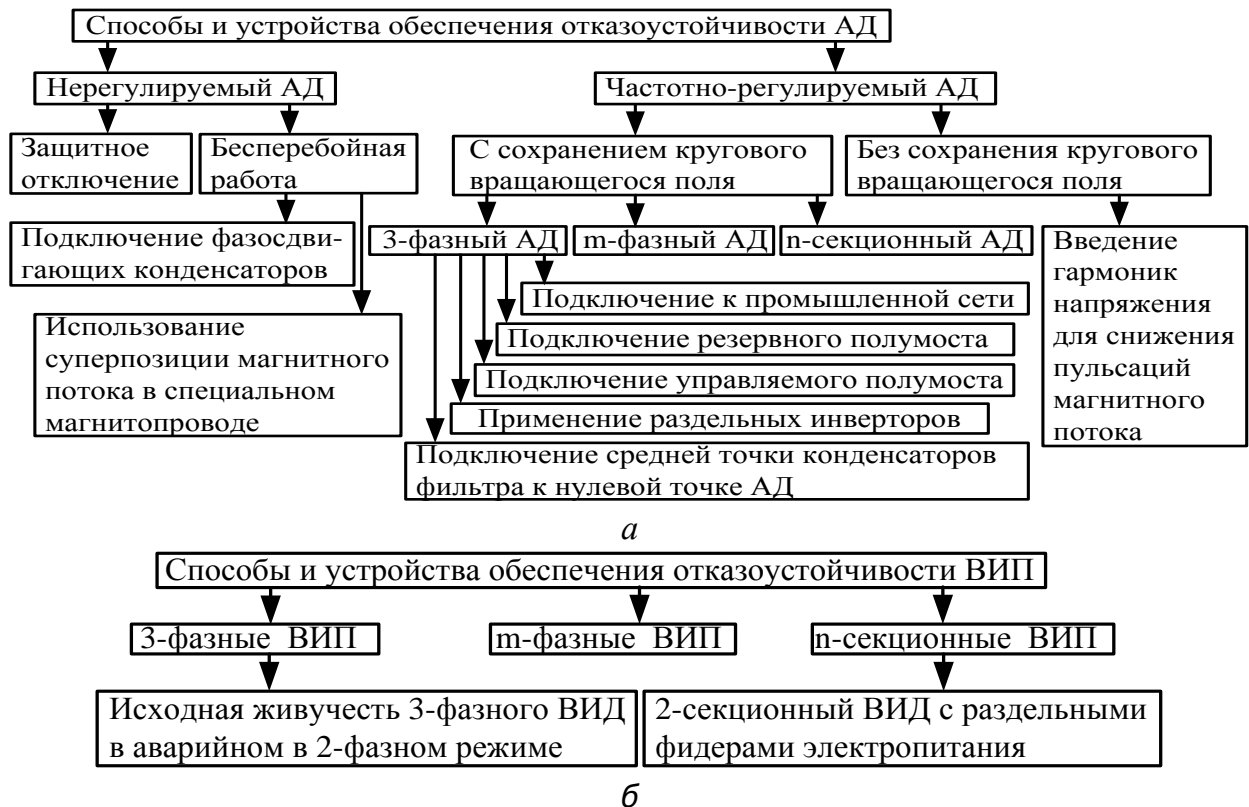
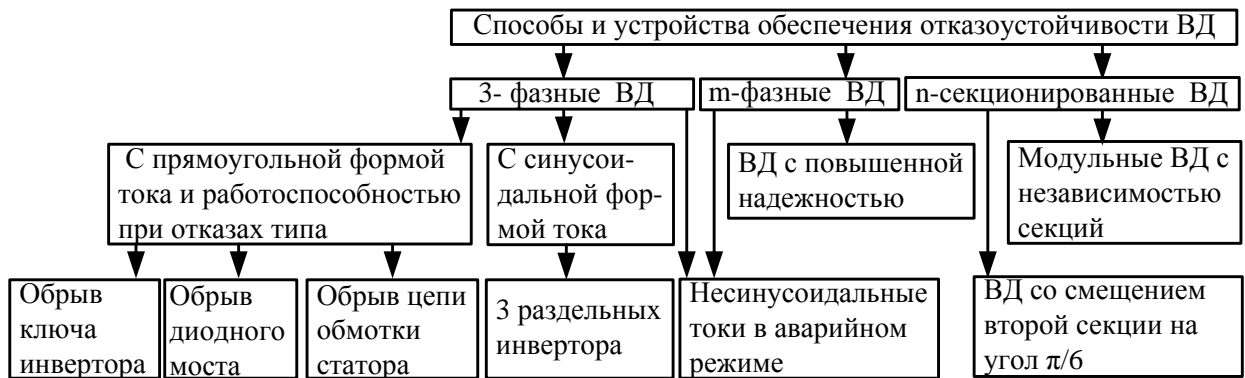


Рис. 2. Способы и устройства обеспечения отказоустойчивости: а – АД; б – ВИП



в

Рис. 2. Способы и устройства обеспечения отказоустойчивости: в – ВД

Из анализа информации на рис. 2 следует, что основными средствами отказоустойчивости ЭПТ при однократных отказах является применение n -секционных и m -фазных двигателей, при этом алгоритмическое обеспечение по восстановлению работоспособности трехфазных ЭП разработано недостаточно.

Во второй главе рассмотрен метод отказоустойчивого управления ЭПТ с обеспечением свойства живучести. Из теории построения ТС следует, что свойство живучести присуще только избыточным системам, которое обычно реализуется через резервирование. Для современного ЭПТ, построенного на основе микроконтроллерных (МК) средств, отдельные виды резервирования уже заложены в структуру ЭПТ и могут быть применены при активизации алгоритма восстановления его работоспособности при отказах. Так, информационное резервирование может быть определено как вычислительный ресурс процессора, который согласно закону Гордона Мура обеспечивает за 1,5–2 года удвоение вычислительных возможностей. Временное резервирование обеспечивается для ЭПТ высокочастотным широтно-импульсным модулятором (ШИМ) преобразователя частоты (ПЧ), с учетом инерции маховых масс двигателя и механической нагрузки во время переключения структуры электропривода при вводе в работу резерва. Нагрузочное резервирование обеспечивается запасом по току и напряжению силовых элементов или снижением режимов функционирования. Функциональное резервирование включает в себя комплексное использование информационного, временного и нагрузочного видов резерва при реализации алгоритмов восстановления ЭПТ.

По структуре построения можно выделить ЭПТ, выполненный по схеме со связанными фазами силового преобразователя (СП) и двигателя (рис. 3, б, ж, з), который при отказах ПЧ или двигателя типа обрыв фазы полностью теряет работоспособность (магнитное поле в зазоре пульсирующее), если управление ЭП не обеспечивает переключение на схему с развязанными фазами (рис. 3, г, д). Применение ЭПТ с развязанными фазами преобразовательных ячеек (ПЯ) (рис. 3, а, в, и) позволяет сохранить частичную работоспособность ЭП с эллиптическим вращающимся полем при отказе в одной из фаз и получить исходные характеристики живучести. Использование исходной живучести односекционного 3-фазного ВИД (рис. 3, л) в аварийном в 2-фазном режиме также позволяет сохранить частичную работоспособность с ограничением электромагнитного момента на уровне $2/3$ от номинального значения. Так, применение алгоритмического восстановления работоспособности для схем ЭПТ с развязанными фазами АД, ВД в аварийном режиме (рис. 3, а, в, г, д) позволяет сохранить круговое вращающееся поле.

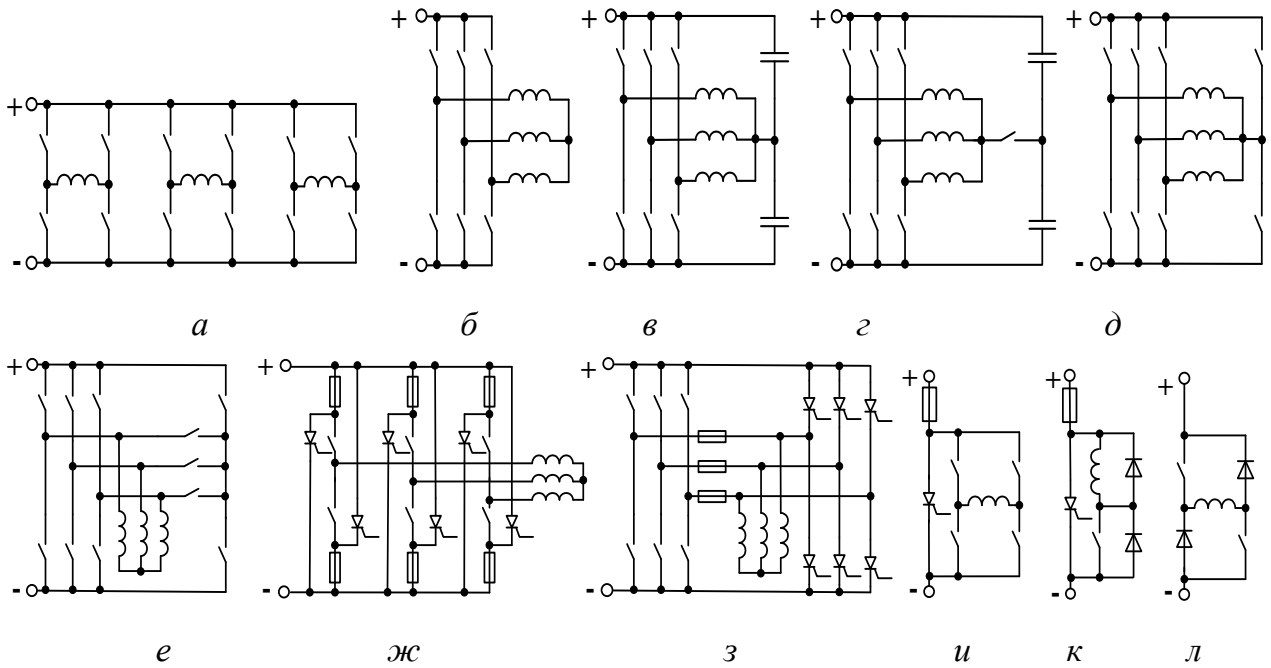


Рис. 3. Схемы трехфазного СП ЭПТ: а – мостовая с развязанными фазами; б – мостовая со связанными фазами; в – полумостовая с развязанными фазами; г – мостовая с дополнительным ключом; д – мостовая с управляемым полумостом; е – мостовая с резервным полумостом; схемы трехфазного СП ЭПТ с защитными элементами (ЗЭ), расположенными в звене: ж – постоянного тока; з – переменного тока; и – СП с ЗЭ и мостовой ПЯ; к – ПЯ СП ВИП с ЗЭ и одним ключом; л – ПЯ СП ВИП с двумя ключами

Круговое вращающееся магнитное поле для двухфазного режима трехфазной электрической машины (ЭМ) с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками возможно при условии:

$$\begin{cases} \delta + \beta = \pi; \\ F_{AM} = F_{CM}, \end{cases} \quad (1)$$

где F_{AM} , F_{CM} – амплитуды магнитодвижущих сил (МДС); δ – пространственный угол сдвига обмоток, $\delta = 2\pi/3$; β – временной угол сдвига токов в обмотках, $\beta = \pi/3$. Наличие регуляторов тока в системе управления ЭПТ обеспечивает: $F_{AM} = F_{CM}$. Выполнение условия (1) предполагает технические решения с различными алгоритмами работы ЭПТ и позволяет сформировать избыточность на основе функционального резерва для АД и ВД.

Дальнейшее повышение избыточности АД, ВД (рис. 3, е) связано с применением структурного резерва (подключение резервного полумоста, секционирование или увеличение числа фаз $m > 3$), для ВИП – с секционированием.

Решение задач, поставленных в диссертационной работе, основано на следующих теоретических положениях и алгоритмических процедурах, учитывающих изменение технического состояния аварийного ЭП в процессе полного или частичного восстановления его работоспособности.

1. Построение отказоустойчивого ЭПТ формируется путем комплексного применения теории живучести в виде концепции формирования и исчерпания избыточного ресурса с полным или частичным восстановлением функционирования технической системы после отказа ее элементов. Теории надежности в виде расчетных соот-

ношений определения элементов ЭП с повышенной вероятностью безотказной работы и различными видами резервирования. Теории электропривода в виде законов управления и показателей качества функционирования ЭПТ. Теории электрических машин в виде методологии обоснования параметров исполнительных двигателей ЭПТ, использование которых позволяет частично или полностью восстановить его работоспособность. Современных тенденций развития и уровня техники ЭП, силовой электроники и микроконтроллерных систем в виде приоритетного применения информационного резерва в ЭПТ и непрерывного повышения степени интеграции управляющих элементов и силовой электроники. При построении ЭПТ приоритет должен отдаваться схемам, позволяющим обеспечить исходную живучесть: с развязанными фазами силового преобразователя (рис. 3, а, в, и) или применение ВИП (рис. 3, к, л). Функционирование ЭПТ сопровождается изменением характеристик внешней среды и внутренних параметров элементов электропривода, определённым образом взаимосвязанных между собой. При нормальных условиях эксплуатации рабочее состояние электропривода предлагается представить n -мерным вектором параметров $\vec{F}(M, \omega, U, I, T)$.

2. Кратковременные сверхнормативные воздействия на ЭПТ и (или) аварийные внутренние состояния в процессе длительной эксплуатации могут нарушить его работоспособность и привести к повреждениям. Внешние воздействия на ЭП, внутренние отказы ПЧ и двигателя могут быть сведены к электрическим, тепловым и механическим повреждениям и представлены в виде битов матрицы отказов $[M_0]$. Технические и программные средства систем управления ЭПТ позволяют обеспечить мониторинг электрических, тепловых и механических повреждений его элементов в реальном времени и сформировать матрицу отказов $[M_0]$ до того момента времени, когда последствия отказов могут быть критичными для технического объекта.

3. Для оценки последствий от одиночных или множественных отказов элементов ЭПТ и активизации алгоритмов адаптации его структуры предлагается использовать коэффициент s_r резерва:

$$\begin{cases} s_r = m + h - w; \\ s_r \geq 2, \end{cases} \quad (2)$$

где m – число фаз электродвигателя (для n -секционного трехфазного электродвигателя $m = 3n$ или двухфазного электродвигателя $m = 2n$); h – число резервных полумостов ПЧ (при наличии структурного резерва); w – число допустимых отказов по критерию живучести системы ЭПТ с возможностью работы в аварийном двухфазном режиме и восстановлением кругового вращающегося поля.

В случае неполного исчерпания избыточного резерва (остаточного ресурса) ПЧ и двигателя при условии $s_r \geq 2$ запускается процесс полного или частичного восстановления работоспособности ЭПТ путем адаптации структуры ЭП к воздействию электрических повреждений на основе сформированной необходимой основной избыточности ЭП с функциональным или (и) структурным резервированием. При этом предполагается резервирование как по силовым цепям ПЧ, дополнительной избыточностью нагрузочного резерва по мощности силовых цепей ПЧ, так и использование информационного резерва управления и временного резерва на основе учета инерции маховых масс двигателя.

4. При отказе силового преобразователя неисправная ПЯ блокируется от цепей питания с помощью защитных элементов (ЗЭ) (рис. 3, ж–к), расположенных в звене постоянного или переменного тока; при этом выключатель ЗЭ реализуется в виде:

быстродействующего электронного ключа; плавкой вставки с коротящим тиристором; твердотельного реле.

5. Активизируется алгоритм отказоустойчивого управления A_v в виде аналитической записи выражений самоорганизации управления ЭПТ с интегрированными битами матриц отказов $[M_0]$, полученными в процессе мониторинга электропривода в реальном времени A_v . Обеспечивается управление остаточным ресурсом (избыточным резервом) ЭПТ на основе программного формирования токов фаз статора m -фазного двигателя с сохранением кругового вращающегося поля и поворотом векторов тока (для m -фазного двигателя) на угол: $\beta = \pi/m$ с синусоидальными фазными токами или с формированием несинусоидальных фазных токов и компенсацией электромагнитной мощности.

Определяются показатели функционирования ЭПТ, характеризующие изменение качества регулирования в процессе купирования отказов за время T_{II} адаптации структуры электропривода, определяемое как длительность установления фазового сдвига векторов тока равной π/m для АД и ВД или длительность изменения активной мощности ВИП. После полного или частичного восстановления работоспособности ЭПТ, определяются параметры динамической оценки переходных процессов и статической оценки установившихся процессов:

$$\begin{cases} \Delta I = (I_{тп} - I_{отк}) / I_{отк}; \\ \Delta M = (M_{тп} - M_{отк}) / M_{отк}; \\ \Delta \omega = (\omega_{тп} - \omega_{отк}) / \omega_{отк}; \\ \Delta M_s = (M_0 - M_{отк}) / M_{отк}; \\ \Delta \omega_s = (\omega_0 - \omega_{отк}) / \omega_{отк}, \end{cases} \quad (3)$$

где ΔI , ΔM , $\Delta \omega$ – относительные динамические отклонения мгновенных значений тока, момента, частоты вращения соответственно, $I_{отк}$, $M_{отк}$, $\omega_{отк}$ – установившиеся значения тока, момента, частоты вращения соответственно в момент отказа; $I_{тп}$, $M_{тп}$, $\omega_{тп}$ – мгновенные максимальные (минимальные) значения тока, момента, частоты вращения соответственно в течение времени T_{II} от момента времени выявленного отказа; ΔM_s , $\Delta \omega_s$ – отклонения значений момента, частоты вращения соответственно; M_0 , ω_0 – значения момента, частоты вращения соответственно до отказа.

6. Для тепловых и механических повреждений ПЧ и двигателя вычисляется остаточный ресурс работы до момента повреждения двигателя для контролируемых параметров ЭП (перегрев, допустимая амплитуда колебаний элементов конструкции):

$$\delta A_j = A_{j\text{доп}} - A_j, \quad (4)$$

где δA_j – допустимый остаточный ресурс работы по j -параметру; $A_{j\text{доп}}$ – максимально допустимое значение контролируемого j -параметра; A_j – значение контролируемого j -параметра. Определяется возможность снижения мощности двигателя с переходом в облегченный режим функционирования ЭПТ.

7. Формируется пространство параметров $\vec{F}(M, \omega, U, I, T)$ отказоустойчивого управления ЭПТ для электрических, тепловых и механических повреждений на основе матрицы отказов $[M_0]$, задействованного избыточного ресурса электропривода и алгоритма A_v отказоустойчивого управления.

Для исследования алгоритмов отказоустойчивого управления ЭПТ и обоснованности технических решений в аварийных и неполнофазных режимах работы электроприводов разработаны математические и имитационные модели.

В третьей главе рассмотрены математические и имитационные модели ЭПТ в аварийных режимах работы.

В общем случае состояние модели X в аварийном режиме ЭПТ можно представить функционалом:

$$X = X(A_M, [M_0], A_v, s_r, z, T_{\Pi}, M_1, M_2, \Delta M, \Delta \omega). \quad (5)$$

Созданные математические и имитационные модели ЭПТ позволяют:

- исследовать алгоритм мониторинга A_M текущего состояния ЭПТ в реальном времени с формированием матрицы отказов $[M_0]$;
- реализовывать задание алгоритмов отказоустойчивого управления A_v с учетом битов a, b, c , матрицы отказов $[M_0]$;
- включать в состав алгоритма управления избыточный ресурс ПЧ и двигателя, если число оставшихся в работе фаз двигателя $s_r \geq 2$ (в т.ч. однофазный режим $s_r = 1$);
- задавать параметр T_{Π} – длительность переключения структуры ЭП при восстановлении работоспособности;
- задавать тип магнитного поля в зазоре ЭМ: пульсирующее, эллиптическое и круговое, учитывать воздействие прямой (момент M_1) и обратной (момент M_2) последовательности поля;
- выбирать схемы подключения: со связанными ($z = 1$) и развязанными ($z = 0$) фазами двигателя;
- определять показатели качества работы ЭПТ для переходных и установившихся процессов: $\Delta I, \Delta M, \Delta \omega, \Delta M_s, \Delta \omega_s$ после полного или частичного восстановления работоспособности.

При рассмотрении рабочих и аварийных режимов работы трехфазного двигателя можно выделить следующие признаки формирования магнитного поля и конфигурации схемы подключения [16]:

- круговое вращающееся магнитное поле и схема подключения со связанными фазами, $z = 1$;
- пульсирующее магнитное поле и схема подключения со связанными фазами, $z = 1$;
- круговое вращающееся магнитное поле и схема подключения с развязанными фазами, $z = 0$;
- эллиптическое вращающееся магнитное поле и схема подключения с развязанными фазами, $z = 0$;
- круговое вращающееся магнитное поле за счет алгоритмического восстановления работоспособности, $z = 0$.

Алгоритм A_v восстановления работоспособности трехфазного ЭПТ предполагает формирование задания на фазные токи статора в виде выражений самоорганизации управления с интегрированными битами матрицы отказов:

$$A_v = \left\{ \begin{array}{l} I_A(a, b, c, d, I_{\omega}, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_K) \\ I_B(a, b, c, d, I_{\omega}, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_K) \\ I_C(a, b, c, d, I_{\omega}, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_K) \end{array} \right\}. \quad (6)$$

В аварийном двухфазном режиме работы трехфазного ЭПТ присутствует эллиптическое магнитное поле в воздушном зазоре ЭМ, которое может быть представлено результатом воздействия полей прямой и обратной последовательности. Для моделирования задания обрыва фазы статора в исходные уравнения полей прямой и обратной последовательности вводится матрица отказов $[M_0]$, позволяющая сформировать аварийный двухфазный режим работы. В этом случае бит отказа ($\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$) соответствующей отказавшей фазы приравнивается к единице.

Система уравнений математической модели ЭП в неполнофазном аварийном трехфазном АД со схемами подключения со связанными и развязанными фазами [13, 16, 18] имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} (z \cdot [i_{1Л}] + \bar{z} \cdot [i_1]) = (z \cdot [L_{1Л}]^{-1} + \bar{z} \cdot [L_1]^{-1}) \times \\ \times \left\{ (z \cdot [U_{1Л}] + \bar{z} \cdot [U_1]) - \left[(z \cdot [R_{МЛ}] + \bar{z} \cdot [R_M]) + (z \cdot [L_{2Л}] + \bar{z} \cdot [L_2]) \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] [i_1] \right\}; \\ \frac{d}{dt} (z \cdot [i_{2Л}] + \bar{z} \cdot [i_2]) = (z \cdot [L_{1Л}]^{-1} + \bar{z} \cdot [L_1]^{-1}) \times \\ \times \left\{ (z \cdot [U_{2Л}] + \bar{z} \cdot [U_2]) - \left[(z \cdot [R_{МЛ}] + \bar{z} \cdot [R_M]) + (z \cdot [L_{2Л}] + \bar{z} \cdot [L_2]) \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] [i_2] \right\}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty [M_O]) [R]; \\ [R_{МЛ}] = ([1] + k_\infty [M_{ОЛ}]) [R_L]; \\ T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 - M_c); \\ M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{c1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{c1} i_{a1})]; \\ M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{c2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{c2} i_{a2})], \end{array} \right. \quad (7)$$

где $[i_{1Л}]$, $[i_{2Л}]$, $[i_1]$, $[i_2]$ – матрицы линейных (для связанных фаз ЭП ($z = 1$)) и фазных (для развязанных фаз ЭП ($z = 0$)) токов статора и ротора прямой (индекс 1) и обратной (индекс 2) последовательностей соответственно; $[U_1]$, $[U_2]$, $[U_{1Л}]$, $[U_{2Л}]$ – матрицы фазных и линейных напряжений статора и ротора прямой и обратной последовательностей соответственно; $[M_O]$, $[M_{ОЛ}]$ – фазная и линейная матрицы отказов ЭМ; $[L_{1Л}]$, $[L_{2Л}]$ – линейные матрицы индуктивностей и $[L_1]$, $[L_2]$ – фазные матрицы индуктивностей; $[L_{1Л}]^{-1}$, $[L_1]^{-1}$ – обратные матрицы $[L_{1Л}]$, $[L_1]$; $[R_L]$, $[R]$ – линейные и фазные матрицы сопротивлений до отказа и $[R_M]$, $[R_{МЛ}]$ – после отказа; $[1]$ – единичная матрица размером 6 на 6; k_∞ – коэффициент, учитывающий введение высокоомного сопротивления в цепь статора ЭМ; t_1 – отметка времени выявленного отказа; t_2 – отметка времени восстановления кругового вращающегося поля; ω – частота вращения; M_1 , M_2 – электромагнитный момент полей прямой и обратной последовательности; M_c – момент сопротивления механической нагрузки; J – суммарный момент инерции ЭП; p – число пар полюсов; L_S , L_R – индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность между обмотками ротора и статора.

На рис. 4 приведены временные диаграммы результатов моделирования аварийного отключения фазы АД при векторном (а) и скалярном (б) управлении; переходные процессы по частоте вращения при обрыве фазы статора АД для случая связанных фаз с учетом поля обратной последовательности ω_1 и без учета ω_2 (в) (схема подключения – связанные фазы, номинальная нагрузка); зависимости суммарной активной и реактивной мощности ВД в аварийном двухфазном режиме: $\varepsilon - P_\Sigma(I, \psi)$, $\delta - P_\Sigma(n, \psi)$, $e - Q_\Sigma(I, \psi)$, $ж - Q_\Sigma(n, \psi)$.

На рис. 4, а, б показан процесс формирования интервала времени переключения структуры ЭП – T_{Π} по равенству фазовых сдвигов двух векторов тока на угол $\pi/3$, в случае векторного управления величина T_{Π} уменьшается в 1,7 раза по сравнению со скалярным. На рис. 4, в видно различие: диаграмма ω_1 – торможение с учетом обратного момента M_2 и без учета – диаграмма ω_2 . Неучет магнитного поля обратной последовательности приводит к неверным результатам моделирования АД. Диаграммы рис. 4, ε – $ж$ дают количественные и качественные характеристики суммарной актив-

ной и реактивной мощностей трехфазного синхронного двигателя (СД) ДСТ-0,18 в аварийном двухфазном режиме.

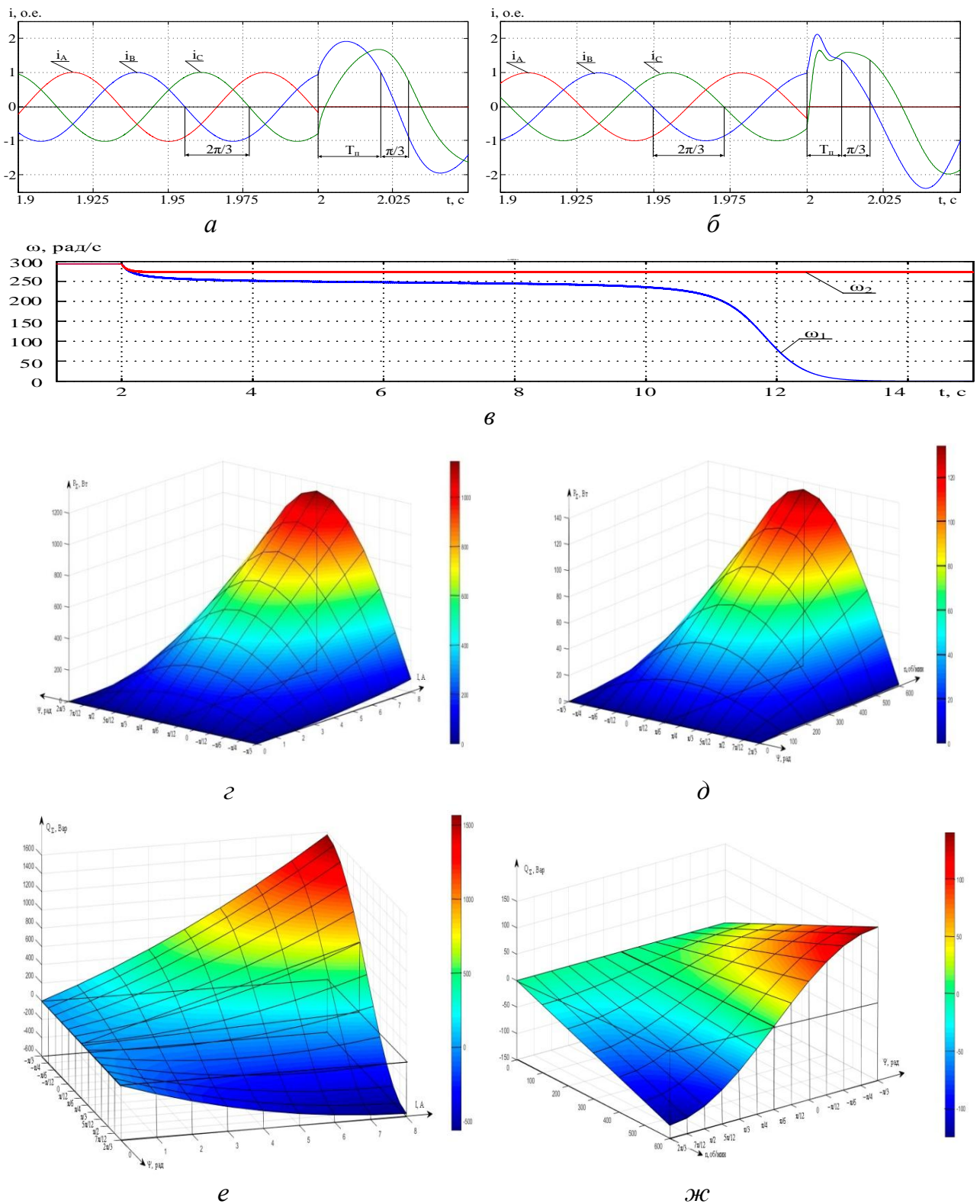


Рис. 4. Временные диаграммы результатов моделирования аварийного отключения фазы АД при скалярном (а) и векторном (б) управлении; переходные процессы по частоте вращения при обрыве фазы статора АД для случая связанных фаз с учетом поля обратной последовательности ω_1 и без учета ω_2 (в); зависимости суммарной активной и реактивной мощности ВД в аварийном двухфазном режиме: з – $P_\Sigma(I, \psi)$, д – $P_\Sigma(n, \psi)$, е – $Q_\Sigma(I, \psi)$, ж – $Q_\Sigma(n, \psi)$

В трехфазном режиме ВД электромагнитный момент максимален при максимуме активной мощности для углов нагрузки $\theta = \theta_A = \theta_B = \theta_C = \pi/2$. В двухфазном режиме ВД углы θ_A и θ_C не равны (отказ фазы "В"), так как не равны по амплитуде (в общем случае) векторы фазных напряжений \vec{U}_A и \vec{U}_C и фазовые сдвиги углов φ_A и φ_C имеют разные знаки относительно векторов тока. Поэтому нецелесообразно осуществлять управление ВД в неполнофазном режиме на основе углов θ_A и θ_C как параметров, определяющих максимум момента. Выбор и оптимизация значения угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме могут быть выполнены на основе статической модели расчета суммарных активной и реактивной мощностей ВД [27]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = I_{AM} \sin(\omega t + \pi + \psi_A) r + I_{AM} \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2} + \psi_A\right) (L_A + L_S) \omega + \\ + \text{sign}(\varphi_C) I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \psi_A\right) \omega L_M + E_{AM} \sin(\omega t + \pi); \\ U_C = I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \psi_A\right) r + I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{11\pi}{6} + \psi_A\right) (L_A + L_S) \omega + \\ + \text{sign}(\varphi_A) I_{AM} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \psi_A\right) \omega L_M + \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{3}\right); \\ \text{sign}(\varphi) = 1, \text{ если } \varphi \geq 0; \text{ sign}(\varphi) = -1, \text{ если } \varphi < 0; \\ P_\Sigma = \frac{1}{2} (U_{AM} I_{AM} \cos \varphi_A + U_{CM} I_{CM} \cos \varphi_C); \\ Q_\Sigma = \frac{1}{2} (I_{AM} I_{AM} \sin \varphi_A + I_{CM} I_{CM} \sin \varphi_C), \end{array} \right. \quad (8)$$

где I_{AM}, I_{CM} – значения амплитуд векторов фазных токов; E_{AM}, E_{CM} – значения амплитуд векторов фазных электродвижущих сил (ЭДС); P_Σ – суммарная активная, Q_Σ – суммарная реактивная мощности.

В результате расчета получены следующие функциональные зависимости для СД: $P_\Sigma(I, \psi)$, $P_\Sigma(n, \psi)$, $Q_\Sigma(I, \psi)$, $Q_\Sigma(n, \psi)$, представленные на рис. 4, *з–ж*.

Из рис. 4, *з, д* следует, что угол ψ можно сопоставить с углом θ по форме зависимости и диапазону изменения угла π рад. Для определения допустимых значений угла ψ рассмотрим зависимость $Q_\Sigma(I, \psi)$ на рис. 4, *е, ж* (например, для $n = n_{\max} = 6000$ (об/мин)), а зависимость $Q_\Sigma(n, \psi)$ – для действующего значения $I = 1$ А фазного тока.

При значениях угла ψ в диапазоне $\pi/6 \dots \pi/3$ рад. функция $Q_\Sigma(I, \psi)$ пересекает нулевую плоскость. Спад активной мощности не превышает 5 % для зависимостей $P_\Sigma(I, \psi)$ и $P_\Sigma(n, \psi)$ при изменении значения угла ψ_A в диапазоне $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$ рад. В силу этого в аварийном двухфазном режиме максимум активной при минимуме реактивной мощности ВД может быть определен в функции угла ψ_A в диапазоне значений угла $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$ рад.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в неполнофазном аварийном трехфазном ВД [23] имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} [i_1] = [L]^{-1} \{ [U_1] - [R_M] [i_1] - C_E \omega [\cos] \}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty [M_0]) [R]; \\ T_{II} = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_1 - M_c); \\ M_1 = C_M \sin\left(\theta \bar{d} + \left(\psi_A + \frac{\pi}{3}\right) d\right) \left\{ i_{A1} \sin \alpha + i_{B1} \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{C1} \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \right\}; \\ \alpha_m = p \int_0^t \omega dt = p\alpha, \end{array} \right. \quad (9)$$

где $[i_1], [i_2]$ – матрицы фазных токов статора прямой и обратной последовательности; $[U_1], [U_2]$ – матрицы фазных напряжений прямой и обратной последовательности; $[M_0]$ – матрица отказов ВД; $[L], [L]^{-1}$ – прямая и обратная матрица индуктивностей статора; $[R]$ – матрица сопротивлений; $[\cos]$ – матрица косинусов; $[1]$ – единичная матрица размером 3 на 3; ω – частота вращения ротора; α_m, α – значения механического и электрического углов ДПР; θ – угол нагрузки ВД в трехфазном режиме работы; $(\psi_A + \pi/3)$ – аналог угла нагрузки ВД в аварийном двухфазном режиме работы; d, \bar{d} – прямое и инверсное значение бита отказа в ВД; C_M, C_E – постоянные момента и противо-ЭДС ВД.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в трехфазном двухсекционном ВИП [25] имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1}\{[U_1] - [i_1][R_{M1}] - \omega[K_{\omega 1}]\}; \\ \frac{d[i_2]}{dt} = [L_{d2}]^{-1}\{[U_2] - [i_2][R_{M2}] - \omega[K_{\omega 2}]\}; \\ [R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{01}])[R_1]; \\ [R_{M2}] = ([1] + k_{\infty}[M_{02}])[R_2]; \\ T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p_{\text{ВИП}}}{J}(M_1 + M_2 - M_C); \\ M_1 = M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha) + M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha) + M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha); \\ M_2 = M_{A_2}(i_{A_2}, \alpha) + M_{B_2}(i_{B_2}, \alpha) + M_{C_2}(i_{C_2}, \alpha); \\ \alpha_m = p_{\text{ВИП}} \int_0^t \omega dt = p_{\text{ВИП}} \alpha; \\ \omega = k_{\text{ВИП}} \frac{\omega_{\text{э}}}{p_{\text{ВИП}}}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где $[i_1], [i_2]$ – матрицы фазных токов статора первой и второй секций; $[U_1], [U_2]$ – матрицы фазных напряжений первой и второй секций; $[M_{01}], [M_{02}]$ – матрицы отказов первой и второй секций; $[L_{d1}], [L_{d1}]^{-1}, [L_{d2}], [L_{d2}]^{-1}$ – прямая и обратная матрица дифференциальных индуктивностей первой и второй секций в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_{\omega 1}], [K_{\omega 2}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС первой и второй секций в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[R_1], [R_2]$ – матрицы сопротивлений первой и второй секций до отказа и $[R_{M1}], [R_{M2}]$ – после отказа; $[1]$ – единичная матрица размером 3 на 3; t_2 – отметка времени восстановления значения частоты вращения или вращающего момента до отказа ВИП; M_1, M_2 – электромагнитный момент первой и второй секций; $M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha), M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha), M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha), M_{A_2}(i_{A_2}, \alpha), M_{B_2}(i_{B_2}, \alpha), M_{C_2}(i_{C_2}, \alpha)$ – моменты фаз A, B, C первой и второй секций соответственно в функции фазных токов и углового положения электрического угла α ; $\omega_{\text{э}}$ – частота вращения поля статора; $p_{\text{ВИП}}$ – число полюсов ротора ВИП; $k_{\text{ВИП}}$ – коэффициент режима коммутации ВИП, $k_{\text{ВИП}} = 1; 2; 1,5$ – симметричная одиночная, симметричная парная, несимметричная коммутация соответственно.

На основе разработанных математических и имитационных моделей в **четвертой главе** рассмотрено алгоритмическое обеспечение МК систем управления ЭПТ в аварийных режимах работы.

Для функционирования отказоустойчивых алгоритмов восстановления работоспособности 3-фазный ЭПТ (3-фазная секция многофазного ЭП) должен удовлетворять следующим условиям [7, 9, 10].

1. В случае выявления отказа в одной из трех фаз силового преобразователя или двигателя в ЭПТ реализуется аварийный двухфазный режим с алгоритмическим восстановлением работоспособности. Обеспечивается структурное или функциональное резервирование – происходит структурная адаптация силового преобразователя.

2. Силовой преобразователь ЭПТ выполняется по схемам развязанных фаз с тремя ПЯ, представляющими мост (полумост) (рис. 3а, в) или по схеме со связанными фазами на основе ПЯ, представляющих мост с дополнительным ключом (рис. 3г), и необходимым нагрузочным резервированием. В случае функционального резервирования или по схемам со связанными и развязанными фазами при структурном резервировании и наличием ЗЭ для отключения отказавших преобразовательных ячеек силового преобразователя (рис. 3ж–к).

3. Необходимым условием реализации ЭПТ является наличие управляющего МК с информационным (процессорным) резервом для реализации алгоритмов мониторинга отказов и восстановлением работоспособного состояния при аварии с заданиями фазных токов двигателей АД, ВД, ВИП и вида управления (скалярное, векторное). Работа МК выполняется с временным циклом не менее периода квантования ШИМ силового преобразователя.

4. Предполагается, что электропривод содержит обратные связи по току для поддержания равенства МДС и решения задачи стабилизации кругового вращающегося поля.

5. Информационное обеспечение ЭПТ должно включать информационный резерв для мониторинга отказов ПЯ в виде битов отказов a, b, c матрицы отказов $[M_0]$ алгоритма восстановления работоспособности. Мониторинг отказов осуществляется в каждом цикле ШИМ силового преобразователя.

Алгоритм мониторинга и блокирования цепей питания в аварийном режиме 3-фазного ЭПТ

Алгоритм мониторинга A_M текущего состояния ЭПТ с формированием матрицы отказов $[M_0]$ осуществляется на каждом интервале ШИМ путем анализа токов в фазах двигателя с выявлением битов отказов a, b, c :

$$A_M = \left\{ \begin{array}{l} \text{если } |I_{3A} - I_{ocA}| \geq \delta \text{ то отказ фазы } A, a = 1, \bar{a} = 0 \\ \text{если } |I_{3B} - I_{ocB}| \geq \delta \text{ то отказ фазы } B, b = 1, \bar{b} = 0 \\ \text{если } |I_{3C} - I_{ocC}| \geq \delta \text{ то отказ фазы } C, c = 1, \bar{c} = 0 \end{array} \right\}; [M_0] = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где I_{3A}, I_{3B}, I_{3C} – значения заданной мгновенной амплитуды формируемых фазных токов; $I_{ocA}, I_{ocB}, I_{ocC}$ – значения мгновенной амплитуды фазных токов с выходов датчиков токов; δ – допустимая динамическая ошибка работы регулятора тока.

Отказ в одной из фаз приводит к блокировке от цепей питания отказавшей ПЯ соответствующим битом отказа $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ путем формирования повышенной величины тока через ЗЭ:

$$I_s \geq k_{pm} k_s I_m, \quad (12)$$

где I_s – значение амплитуды тока через ЗЭ, обеспечивающей разрыв цепи; k_{pm} – кратность тока двигателя при пуске; k_s – кратность тока ЗЭ; I_m – амплитуда тока в статорной обмотке.

Условие (12) по формированию кругового вращающегося поля в неполнофазном режиме трехфазного АД выполняется на основе разработанных способов для скалярного управления: поворотом векторов тока на угол π радиан, поворотом векто-

ров тока на угол $\pi/3$ радиан и формированием несинусоидальных токов в двух оставшихся фазах двигателя.

В случае векторного управления необходимо применение дополнительного координатного преобразования. Для скалярного и векторного управления возможно восстановление работоспособности ЭП с применением структурного резерва с подключаемым полумостом.

На рис. 5 приведена классификация [24] разработанных алгоритмов отказоустойчивого управления АД (а); диаграммы поворота векторов тока на углы: б – $\pi/3$ рад, в – ξ и $(2\pi/3 - \xi)$ рад, г – π рад.

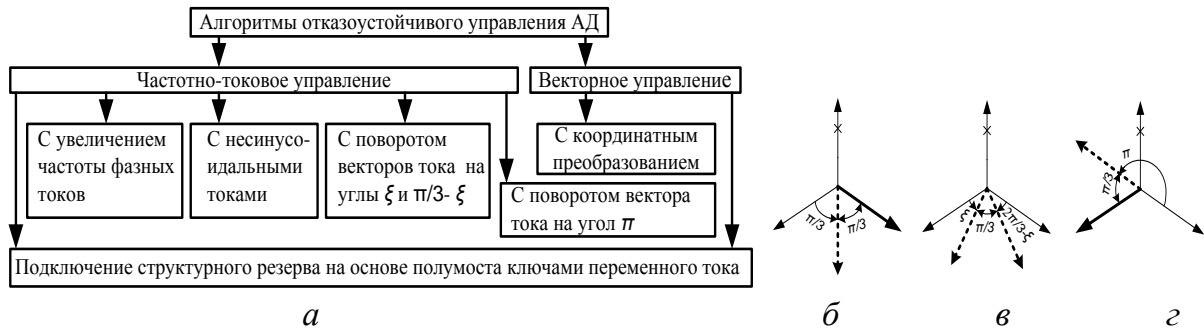


Рис. 5, (а) - алгоритмы отказоустойчивого управления АД; диаграммы поворота векторов тока на углы: б – $\pi/3$ рад, в – ξ и $(2\pi/3 - \xi)$ рад, г – π рад

При формировании алгоритмов восстановления работоспособности АД и ВД с поворотом вектора тока возможны 2 различные формы записи: для опережающей или отстающей фазы вектора тока. Ниже приведены алгоритмы для опережающей фазы вектора тока.

Алгоритм восстановления работоспособности АД с поворотом векторов тока на $\pi/3$ рад и увеличением амплитуды фазных токов

Вычисляется управление фазными токами в двух оставшихся фазах АД [19, 24] (рис. 5, б, в) по следующим выражениям для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} k_o k_d \sin(\alpha + c\xi - b(\pi/3 - \xi)); \\ I_B &= I_\omega \bar{b} k_o k_d \sin(\alpha + a\xi - c(\pi/3 - \xi) + 2\pi/3); \\ I_C &= I_\omega \bar{c} k_o k_d \sin(\alpha + b\xi - a(\pi/3 - \xi) + 4\pi/3), \end{aligned} \quad (13)$$

где k_o – коэффициент отключения двигателя в аварийном режиме, $k_o = 0$, если $\bar{a} + \bar{b} + \bar{c} \geq 2$, иначе $k_o = 1$; k_d – коэффициент увеличения амплитуды фазных токов в аварийном режиме, $k_d = (d + \bar{d}3/2)$; (14)

ξ – значение угла поворота первого вектора тока, рад; $(2\pi/3 - \xi)$ – значение угла поворота второго вектора тока, рад.

Алгоритм отказоустойчивого управления асинхронным ЭП со структурным резервированием

Вычисляется управление фазными токами I_A , I_B , I_C и токами резервного полумоста I_p по выражениям [11]:

$$\begin{cases} I_A = I_\omega \overline{d_{\text{ТП}}} \overline{a} \sin \alpha; \\ I_B = I_\omega \overline{d_{\text{ТП}}} \overline{b} \sin(\alpha + 2\pi/3); \\ I_C = I_\omega \overline{d_{\text{ТП}}} \overline{c} \sin(\alpha + 4\pi/3); \\ I_p = I_\omega \overline{d_{\text{ТП}}} (a \sin \alpha + b \sin(\alpha + 2\pi/3) + c \sin(\alpha + 4\pi/3)), \end{cases} \quad (15)$$

если $\overline{d_{\text{ТП}}} = 0$ – есть отказ в одной из фаз ПЧ, $d_{\text{ТП}} = a \cup b \cup c$, (\cup – операция "ИЛИ") $T_{\text{П}}$, множитель $\overline{d_{\text{ТП}}}$ – обнуляет управляющие сигналы и формирует бестоковую паузу для подключения ЗЭ и резервного полумоста.

Алгоритм отказоустойчивого управления ЭПТ АД с поворотом векторов тока на угол $\pi/3$ радиан и увеличением частоты фазных токов

Вычисляется управление фазными токами I_A, I_B, I_C АД по выражениям [42]:

$$\begin{cases} I_A = I_\omega \overline{a} k_\omega \sin(2\pi f t k_\omega p - b\pi/3); \\ I_B = I_\omega \overline{b} k_\omega \sin(2\pi f t k_\omega p - c\pi/3 + 2\pi/3); \\ I_C = I_\omega \overline{c} k_\omega \sin(2\pi f t k_\omega p - a\pi/3 + 4\pi/3), \end{cases} \quad (16)$$

где f – частота формируемых фазных токов; t – текущий отсчет меток таймера; k_ω – коэффициент увеличения частоты фазных токов.

Алгоритм восстановления работоспособности АД с формированием несинусоидальных токов

Восстановление работоспособности m -фазного АД выполняется при условии постоянства активной мощности P_m до и P_w – после выявления w отказов с соответствующим увеличением токов в работоспособных фазах АД в k раз [15, 24]:

$k = P_m / P_w$ для выполнения условия: $P_m = k P_w$.

Анализируется остаточный резерв s_r ЭП, вычисляемый по выражению (2), для: $n = 1, h = 0, s_r = m - w$, и если $s_r \geq 2$, возможно восстановление работоспособности ЭП:

$$k = \frac{P_w}{P_m} = \frac{I_w \Sigma}{I_m \Sigma} = \frac{\frac{m}{2}}{\sum_{i=1}^m \overline{a}_i \sin^2(\alpha + \frac{2\pi(i-1)}{m})}. \quad (17)$$

Фазные несинусоидальные токи АД вычисляются по выражениям:

$$I_i = \frac{I_m \sin(\alpha + \frac{2\pi(i-1)}{m}) \frac{m}{2}}{\sum_{i=1}^m \overline{a}_i \sin^2(\alpha + \frac{2\pi(i-1)}{m})}, \quad (18)$$

где I_i – задание на ток i -й фазы АД; I_m – амплитуда задание на ток АД; \overline{a}_i – инверсное значение бита a_i i -й фазы АД.

При $m = 3$ и $w = 2$ и отказе в фазе «А» выражение (17) упрощается:

$$k = \frac{P_2}{P_3} = \frac{I_{2\Sigma}}{I_{3\Sigma}} = \frac{\frac{3}{2}}{\overline{b} \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) + \overline{c} \sin(\alpha + \frac{4\pi}{3})}. \quad (19)$$

Фазные несинусоидальные токи при $m = 3$ и $w = 2$ вычисляются по выражениям:

$$I_b = \frac{\frac{3}{2} I_m \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3})}{\overline{b} \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) + \overline{c} \sin(\alpha + \frac{4\pi}{3})}; \quad I_c = \frac{\frac{3}{2} I_m \sin(\alpha + \frac{4\pi}{3})}{\overline{b} \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) + \overline{c} \sin(\alpha + \frac{4\pi}{3})}. \quad (20)$$

Алгоритм отказоустойчивого управления ЭПТ с векторным управлением АД

Вышеприведенные алгоритмы восстановления работоспособности имеют ограничения для систем управления со скалярным управлением и неприменимы для систем ЭП с векторным управлением. Система векторного управления ЭП в неполнофазном режиме АД, выполненного по схеме с развязанными фазами, неработоспособна [17, 21, 24].

Восстановление работоспособности обеспечивается путем добавления в систему векторного управления координатного преобразователя тока, реализующего алгоритм управления в соответствии с битами отказов фаз. Система отказоустойчивого векторного управления, представленная на рис. 6, включает регулятор потокосцепления и скорости, а также три регулятора тока. Сигнал задания на ток, вырабатываемый регуляторами потокосцепления и скорости, поступает в координатный преобразователь, где происходит преобразование из вращающейся системы координат x, y в неподвижную – a, b . Далее в зависимости от режима работы происходит координатное преобразование согласно выражению (21).

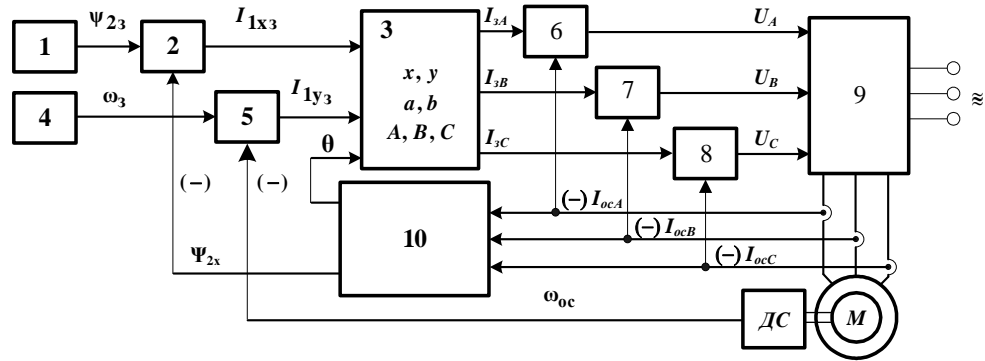


Рис. 6. Система векторного управления отказоустойчивым АД:

- 1 – задатчик потокосцепления ротора; 2 – регулятор потокосцепления ротора;
3 – координатный преобразователь тока; 4 – задатчик частоты вращения;
5 – регулятор частоты вращения; 6, 7, 8 – регуляторы тока статора; 9 – ПЧ;
10 – блок вычисления потокосцепления

Координатное преобразование для сдвига векторов тока на угол $\pi/3$ имеет вид для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{bmatrix} \bar{a}k_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b}k_d & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c}k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(c\pi/3) & \sin(c\pi/3) & 1 \\ \cos(-2\pi/3 - a\pi/3) & \sin(-2\pi/3 + a\pi/3) & 1 \\ \cos(2\pi/3 - b\pi/3) & \sin(2\pi/3 + b\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Алгоритм отказоустойчивого управления трехфазным ВД

Вычисляется управление фазными токами в электроприводе с ВД [4, 8, 36] для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} \sin \left((2^\sigma - 1 - \alpha) \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) d \pm \pi b \right); \\ I_B &= I_\omega \bar{b} \sin \left((2^\sigma - 1 - \alpha) \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) d \pm \pi c + 2\pi/3 \right); \\ I_C &= I_\omega \bar{c} \sin \left((2^\sigma - 1 - \alpha) \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) d \pm \pi a + 4\pi/3 \right), \end{aligned} \quad (22)$$

где σ – выходной код датчика положения ротора.

Логическое умножение соответствующего бита отказа a, b, c на сомножитель $\pm \pi$ рад позволяет сформировать фазовый сдвиг равный $\pi/3$ для двух векторов тока, и также происходит изменение угла нагрузки с θ на ψ_A с достижением максимумом активной мощности в неполнофазном режиме.

Алгоритм отказоустойчивого управления ВИП с увеличением амплитуды фазных токов

Вычисляется управление фазными токами ВИП для векторов токов фаз по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \alpha) - \alpha)]/2; \\ I_B &= I_\omega \bar{b} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \alpha) - \alpha)]/2; \\ I_C &= I_\omega \bar{c} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \alpha) - \alpha)]/2, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\varphi(i_A, \alpha)$, $\varphi(i_B, \alpha)$, $\varphi(i_C, \alpha)$ – значения формируемого угла для каждой фазы в функции фазных токов и угла нагрузки; $\text{sign}(x)$ – функция определяющая знак выражения (x).

Алгоритм отказоустойчивого управления ВИП с изменением угла перекрытия фаз

Вычисляется управление фазными токами ВИП для векторов токов фаз по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} [1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2; \\ I_B &= I_\omega \bar{b} [1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2; \\ I_C &= I_\omega \bar{c} [1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2, \end{aligned} \quad (24)$$

где α_k – угол перекрытия фаз двигателя ($\alpha_k = \pi/4$).

Алгоритм отказоустойчивого управления ВИП с увеличением амплитуды фазных токов и изменением угла перекрытия фаз

Вычисляется управление фазными токами ВИП для векторов токов фаз по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_\omega \bar{a} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_A, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2; \\ I_B &= I_\omega \bar{b} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_B, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2; \\ I_C &= I_\omega \bar{c} k_d [1 + \text{sign}(\varphi(i_C, \alpha) - \alpha + d\alpha_k)]/2. \end{aligned} \quad (25)$$

Алгоритм отказоустойчивого управления двухсекционным 3-фазным ВИП

Вычисляется управление фазными токами двухсекционного ВИП для векторов токов фаз по выражениям [14, 22]:

$$\begin{aligned} I_{1A} &= I_\omega \bar{a} \bar{1} (1 + \bar{a} \bar{2}) \frac{2}{4 \bar{a} \bar{2}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1A}, \alpha) - \alpha)]; \\ I_{1B} &= I_\omega \bar{b} \bar{1} (1 + \bar{b} \bar{2}) \frac{2}{4 \bar{b} \bar{2}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1B}, \alpha) - \alpha)]; \\ I_{1C} &= I_\omega \bar{c} \bar{1} (1 + \bar{c} \bar{2}) \frac{2}{4 \bar{c} \bar{2}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{1C}, \alpha) - \alpha)]; \\ I_{2A} &= I_\omega \bar{a} \bar{2} (1 + \bar{a} \bar{1}) \frac{2}{4 \bar{a} \bar{1}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2A}, \alpha) - \alpha)]; \end{aligned} \quad (26)$$

$$I_{2B} = I_{\omega} \overline{b2} (1 + \overline{b1}) \frac{2}{4\overline{b1}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2B}, \alpha) - \alpha)];$$

$$I_{2C} = I_{\omega} \overline{c2} (1 + \overline{c1}) \frac{2}{4\overline{c1}} [1 + \text{sign}(\varphi(i_{2C}, \alpha) - \alpha)],$$

где $\varphi(i_{1A}, \alpha)$, $\varphi(i_{1B}, \alpha)$, $\varphi(i_{1C}, \alpha)$, $\varphi(i_{2A}, \alpha)$, $\varphi(i_{2B}, \alpha)$, $\varphi(i_{2C}, \alpha)$ – значения формируемого угла управления для каждой фазы и секции в функции фазных токов и угла поворота ротора; $a1, b1, c1$ ($a2, b2, c2$) – биты отказов первой (второй) секции ВИП. В случае отказа в одной из фаз активизируется совмещенный алгоритм, и значения заданий на амплитуду фазного тока в разноименной секции удваивается.

Рассмотрим сравнительный анализ результатов моделирования разработанных алгоритмов восстановления работоспособности электроприводов на основе АД [24] и ВИП [26] и сравнение их характеристик.

Отклонения частоты вращения $\Delta\omega$, момента ΔM и тока ΔI от заданных значений для рассмотренных алгоритмов восстановления АД приведены в таблице 1, на рис. 7 – временные диаграммы переходных процессов в ЭП в аварийном двухфазном режиме.

Таблица 1

№	Алгоритмы работы АД с поворотом векторов тока на углы	$\Delta\omega, \%$	$\Delta M, \%$	$\Delta I, \%$
1	Векторное управление, отстающая фаза $\pi/3$	-5,7	-29,8	107,1
2	Векторное управление, опережающая фаза $\pi/3$	8,3	52,4	140,2
3	Скалярное управление, отстающая фаза π	-78,9	-298,2	577,9
4	Скалярное управление, опережающая фаза π	-19,7	-45,6	211,9
5	Скалярное управление, отстающая фаза $\pi/3$	-21,7	-95,3	272,5
6	Скалярное управление, опережающая фаза $\pi/3$	0	45,4	98,8
7	Скалярное управление, опережающая фаза $\pi/3$, $k_{\omega} = 1,09$	-2,7	-70,7	0
8	Скалярное управление, несинусоидальные токи	-16,6	-133,5	140,4

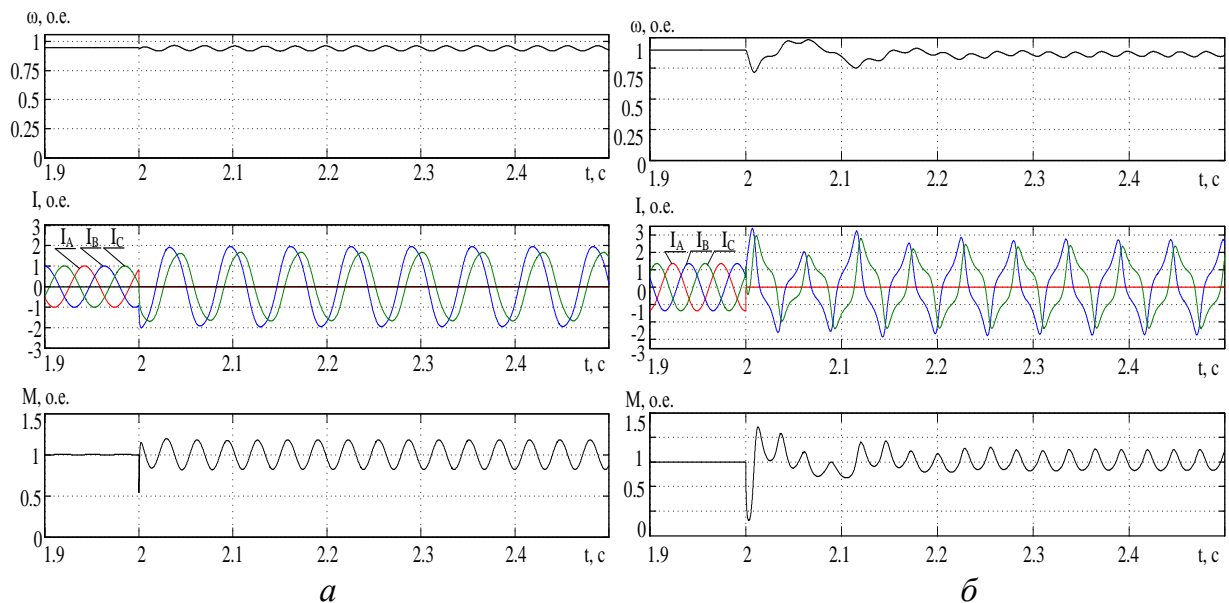


Рис. 7. Временные диаграммы переходных процессов в ЭП с АД в аварийном двухфазном режиме: а – скалярное управление для опережающей фазы со сдвигом вектора на угол $\pi/3$ рад; б – скалярное управление для несинусоидальных токов

При использовании алгоритма со сдвигом вектора тока на угол π для отстающей фазы провал по частоте вращения является максимальным и составляет 78,9 % от номинального значения.

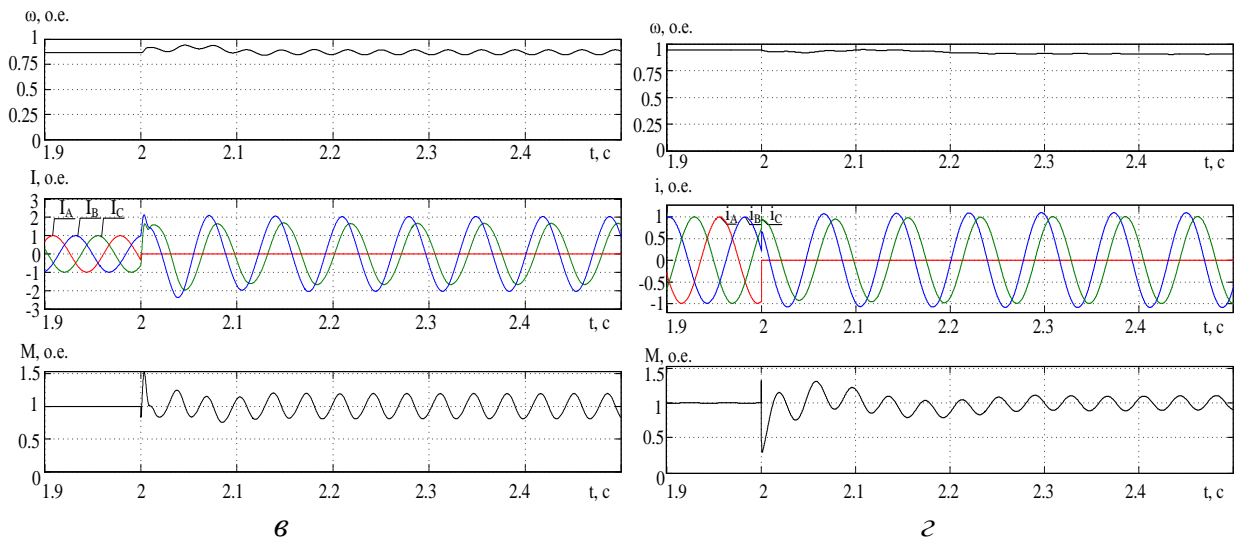


Рис. 7. Временные диаграммы переходных процессов в ЭП с АД в аварийном двухфазном режиме: а – векторное управление для отстающей фазы со сдвигом вектора на угол $\pi/3$ рад; б – скалярное управление АД с увеличением частоты фазных токов $k_{\omega} = 1,09$ и опережающей фазой тока со сдвигом на угол $\pi/3$

Далее следуют алгоритмы с отстающей фазой тока и сдвигом на угол $\pi/3$ с провалом по частоте вращения 21,7 % (рис. 7, а), с опережающей фазой и сдвигом на угол $\pi - 19,7$ %. Из анализа рассмотренных алгоритмов восстановления следует, что снижению провала по частоте вращения в момент аварии способствуют уменьшение углового пути поворота вектора тока с π до $\pi/3$ рад и выбор направления движения вектора тока навстречу движению ротора двигателя. Алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД со скалярным управлением с несинусоидальными токами позволяют получить провал по частоте вращения 16,6 % (рис. 7, б).

Анализируя приведенные данные, можно выделить алгоритмы, дающие лучшие результаты. Так, при использовании векторного управления и опережающей фазы вектора тока со сдвигом на угол $\pi/3$ провал по частоте вращения и моменту отсутствует (рис. 7, в). Среди алгоритмов скалярного управления можно выделить алгоритм для опережающей фазы вектора тока и сдвигом на угол $\pi/3$, при использовании которого провал по частоте вращения отсутствует, а изменения момента и тока минимальны.

В табл. 2 [26] приведены установившиеся значения частоты вращения $\omega_{\text{НОМ}}$ в относительных единицах [о.е.] для одно- и двухсекционных ВИП с алгоритмами восстановления работоспособности (23–26) в процессе исчерпания числа работоспособных фаз m .

Таблица 2

№	Число секций, алгоритм управления резервом ВИП	$\omega_{\text{НОМ}}$, [о.е.]					
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 6$
1	1 секция, пассивный резерв	0	0,66	1	–	–	–
2	1 секция, увеличение амплитуды фазных токов	0,41	0,89	1	–	–	–
3	1 секция, изменение угла перекрытия фаз	0,32	0,9	1	–	–	–
4	1 секция, совмещенный алгоритм	0,65	1	1	–	–	–
5	2 секции, пассивный резерв	0	0,26	0,49	0,7	0,83	1
6	2 секции, увеличение амплитуды фазных токов	0,24	0,61	0,82	0,88	0,9	1

На рис. 8 приведены временные диаграммы переходных процессов частоты вращения $\omega_{\text{ном}}$ односекционного ВВП (а), двухсекционного трехфазного ВВП (б) в процессе исчерпания рабочего ресурса. С пассивным исчерпанием рабочего ресурса. Зависимость «0» отражает применение алгоритмов отказоустойчивого управления в процессе исчерпания рабочего ресурса при последовательных отказах, зависимость «1» – увеличение амплитуды фазных токов, зависимость «2» – изменение угла перекрытия фаз, зависимость «3» – применение совмещенного алгоритма изменения угла перекрытия фаз и увеличения амплитуды фазных токов.

Как следует из рис. 8, а трехфазный ВВП в аварийном двухфазном режиме ($m = 2$) обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью, проявляя свойство исходной отказоустойчивости с поддержанием частоты вращения на уровне 0,66 от номинального значения и при последующем отказе ЭП становится полностью неработоспособен при номинальной нагрузке.

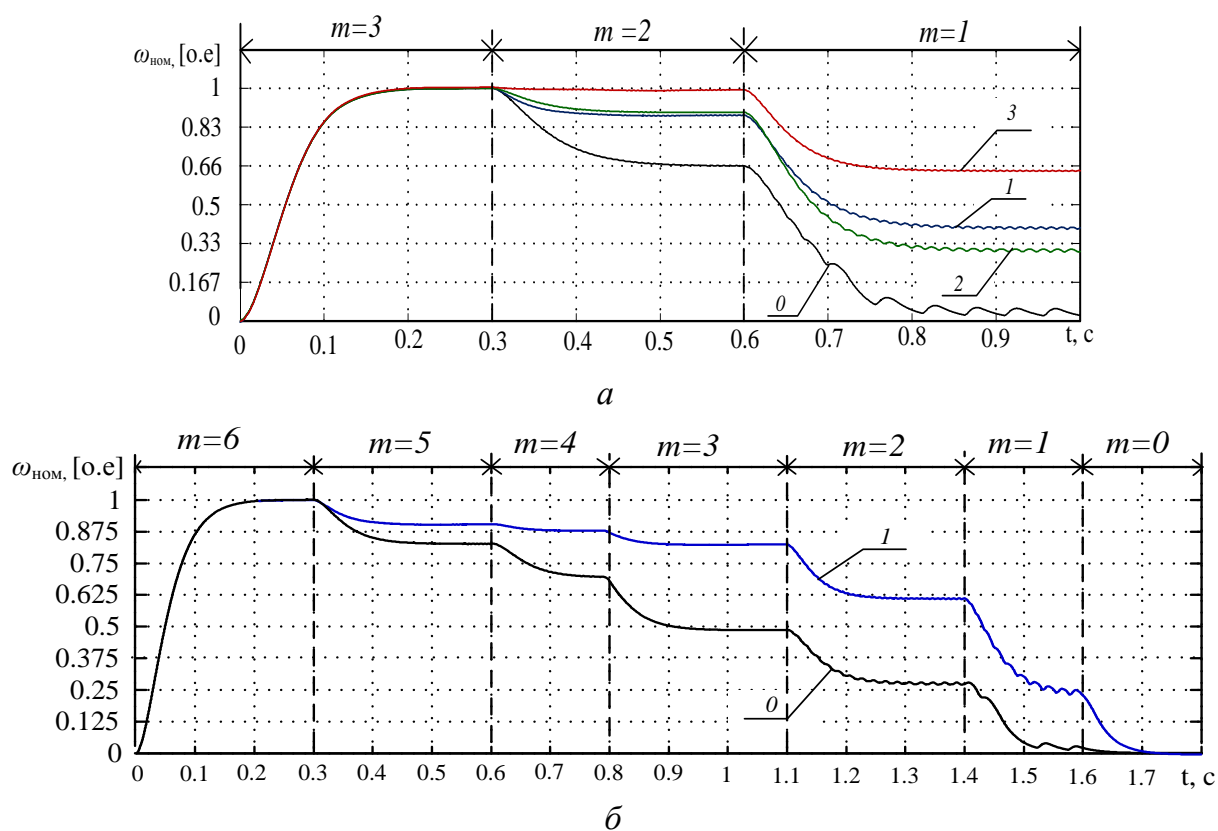


Рис. 8. Временные диаграммы переходных процессов изменения частоты вращения в односекционном ВВП (а): $m = 3...1$; двухсекционном ВВП (б): $m = 6...1$

Разработанные алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме односекционного трехфазного ВВП (рис. 8, а) позволяют обеспечить для алгоритмов: выражение (23) – поддержание значения частоты вращения на уровне 0,89 от номинального значения; (24) – поддержание частоты вращения на уровне 0,9; (25) – полное восстановление работоспособности при номинальной нагрузке [26]; в аварийном однофазном режиме трехфазного ВВП обеспечить поддержание частоты вращения (без возможности пуска) на уровне: (23) – 0,41; (24) – 0,32; (25) – 0,65 при номинальной нагрузке [26].

Как следует из рис. 8, б двухсекционный трехфазный ВВП в аварийных режимах ($m = 5...1$) обеспечивает функционирование с ограниченной работоспособностью, проявляя свойство исходной отказоустойчивости с поддержанием частоты вращения

на уровне $0,9...0,26$ при ($m = 5...2$) при номинальной нагрузке [26]. Разработанный алгоритм (26) отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме двухсекционного трехфазного ВИП позволяет обеспечить: частичное восстановление работоспособности по частоте вращения на уровне $0,9...0,61$ при ($m = 5...2$); в аварийном однофазном режиме обеспечить поддержание частоты вращения (без возможности пуска) на уровне $0,24$ [26].

На рис. 9 приведены зависимости [14] отклонений частоты вращения $\Delta\omega_s(M_c, T_{\Pi})$ в функции нагрузки M_c и времени переключения структуры электропривода T_{Π} для АД (рис. 9, а) и для ВИП (рис. 9, б), позволяющие оценить величину $\Delta\omega_s$ при аварийном отключении одной из фаз двигателя в процессе алгоритмического восстановления работоспособности. Из сравнения рис. 9, а и 9, б видно, что отклонения по частоте вращения (при номинальной нагрузке) для ВИП при значении $\Delta\omega_s = 5...6\%$ достигается за время $T_{\Pi} = 0,1\text{с}$, т. е. на порядок большее время, чем для АД ($T_{\Pi} = 0,01\text{с}$), или практически на порядок меньший провал $\Delta\omega$ за одинаковое время T_{Π} переключения структуры ЭП при номинальной нагрузке.

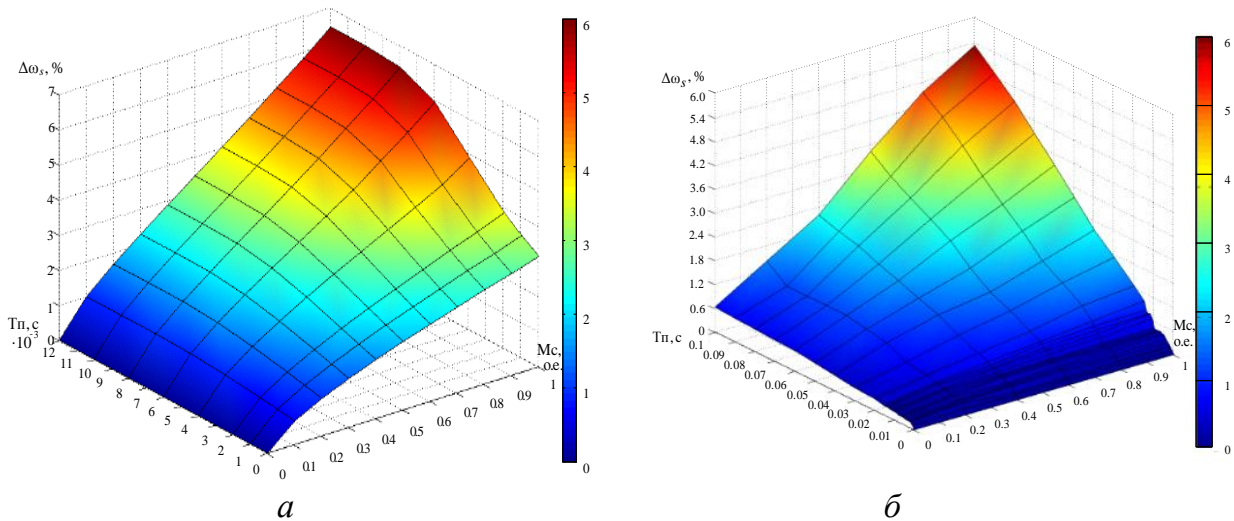


Рис. 9. Зависимости $\Delta\omega_s$ в функции нагрузки M_c , времени переключения структуры электропривода T_{Π} : а – для АД; б – для двухсекционного ВИП

Разработанные алгоритмы отказоустойчивого управления позволяют исследовать работоспособность аварийного ЭПТ как на имитационной модели, так и в составе алгоритмического обеспечения микропроцессорной системы управления отказоустойчивого электропривода.

В пятой главе рассмотрены проверка и применение методов и алгоритмов отказоустойчивого управления в электроприводе переменного тока.

Проверка на адекватность математической и имитационной моделей ЭПТ с АД в среде Matlab Simulink была осуществлена путем сравнения результатов моделирования и экспериментов, выполненных на испытательном стенде [50]. Функциональная схема стенда представлена на рис. 10, а, изображение стенда – на рис. 10, б и временные диаграммы переходных процессов, рассчитанные на модели и полученные экспериментально – на рис. 11 для случая разомкнутого ключа 9 (схема со связанными фазами) [16] и на рис. 12 для случая замкнутого ключа 9 (схема с развязанными фазами) [13]. Измерения обеспечивались регистратором параметров 15 ИВК МПС-300 с разрешением аналого-цифрового преобразователя 16 двоичных разрядов, сертификат № 9569 Госстандарта России об утверждении типа средств измерений RU.C.34.010.A.

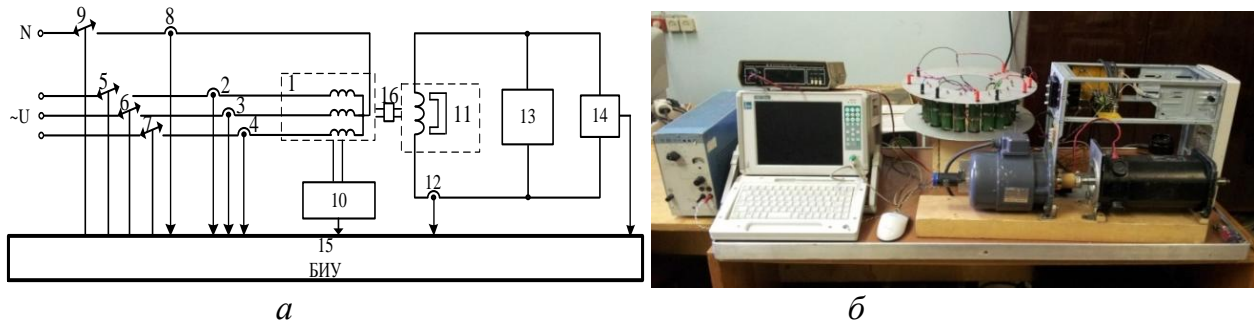


Рис. 10. Функциональная схема (а) испытательного стенда АД: 1 – АД АИР63А; 2–4, 8, 12 – датчики фазного и потребляемого токов; 5–7, 9 – ключи; 10 – датчик частоты вращения; 11 – электродвигатель постоянного тока ППИ 12.1; 13 – датчик напряжения; 14 – блок нагрузки; 15 – (БИУ) блок измерений и управления с измерительной системой МПС-300; 16 – соединительная муфта; испытательный стенд (б)

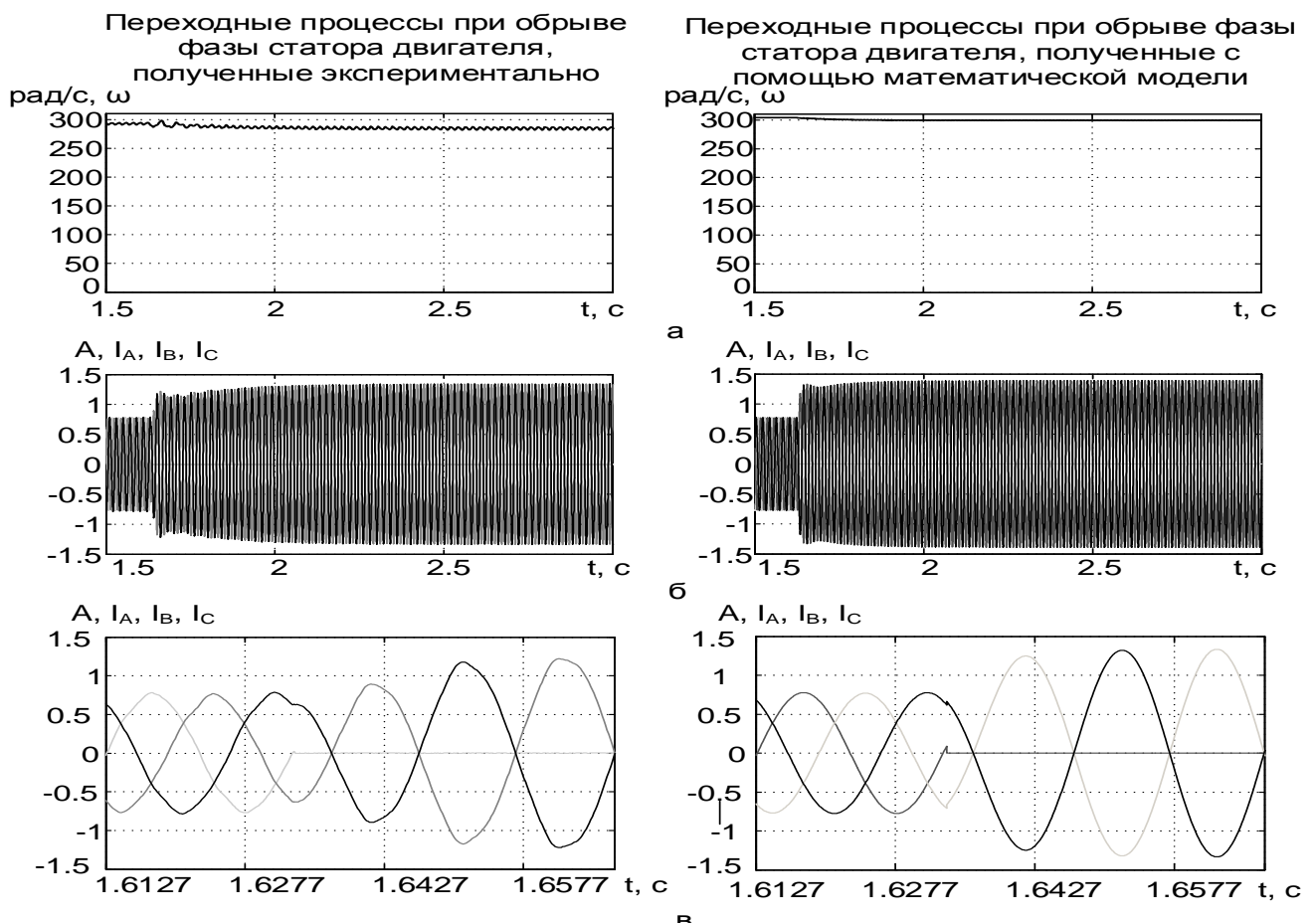


Рис. 11. Временные диаграммы переходных процессов при обрыве фазы статора АД, полученные экспериментально и при помощи математической модели (схема со связанными фазами, ключ 9 на рис.10, а – разомкнут): а – по скорости; б – по току; в – развернутые временные диаграммы по току

Разница между частотами вращения и амплитудами токов АД, полученная в эксперименте и при помощи математической модели, в установившемся трехфазном режиме работы составила 3,6 % и 2,1 % соответственно. Для аварийного двухфазного режима работы эта разница составила 4,9 % и 3,8 % соответственно (рис. 11).

Проверка на адекватность математической и имитационной моделей ЭПТ с ВД в среде Matlab Simulink также выполнялась на испытательном стенде (рис. 12) [53].

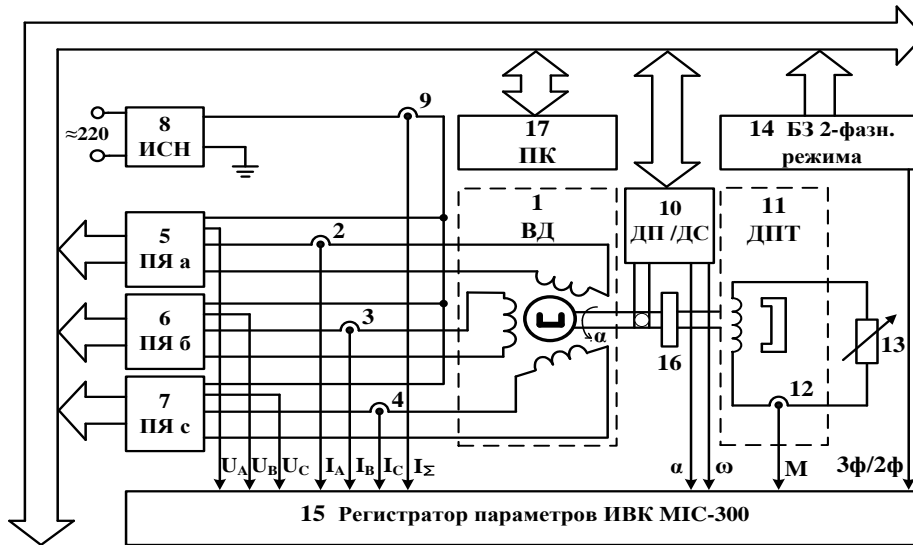


Рис. 12. Функциональная схема испытательного стенда ВД:
 1 – СД ДСТ-0,18; 2–4, 12 – датчики тока; 5–7, – преобразовательные ячейки ПЯ_А, ПЯ_В, ПЯ_С; 8 – источник стабилизированного напряжения; 10 – датчик положения/скорости; 11 – машина постоянного тока (140ВА, 24В); 13 – блок нагрузки; 14 – блок задания 2-фазного режима; 15 – регистратор параметров ИВК МПС-300; 16 – соединительная муфта; 17 – компьютер

На рис. 13 представлен испытательный стенд на основе ВД (а) и система управления ВД с регистратором параметров (б).



Рис. 13. Испытательный стенд на основе ВД (а) и система управления ВД с регистратором параметров (б)

На рис. 14 приведены сравнительные результаты для переходных процессов, полученных на модели и на экспериментальной установке [23].

Программа компьютера переключает структуру ЭП по сигналу коммутации режимов 3ф/2ф: трехфазный режим/двухфазный для неконтролируемой аварийной ситуации или с активизированным алгоритмом восстановления, выражение (22) [36].

Разница между амплитудными значениями токов рис. 14, а, б в эксперименте и на модели в установившемся трехфазном режиме работы составляет 4,5 %, в аварийном двухфазном режиме – 8,9 %.

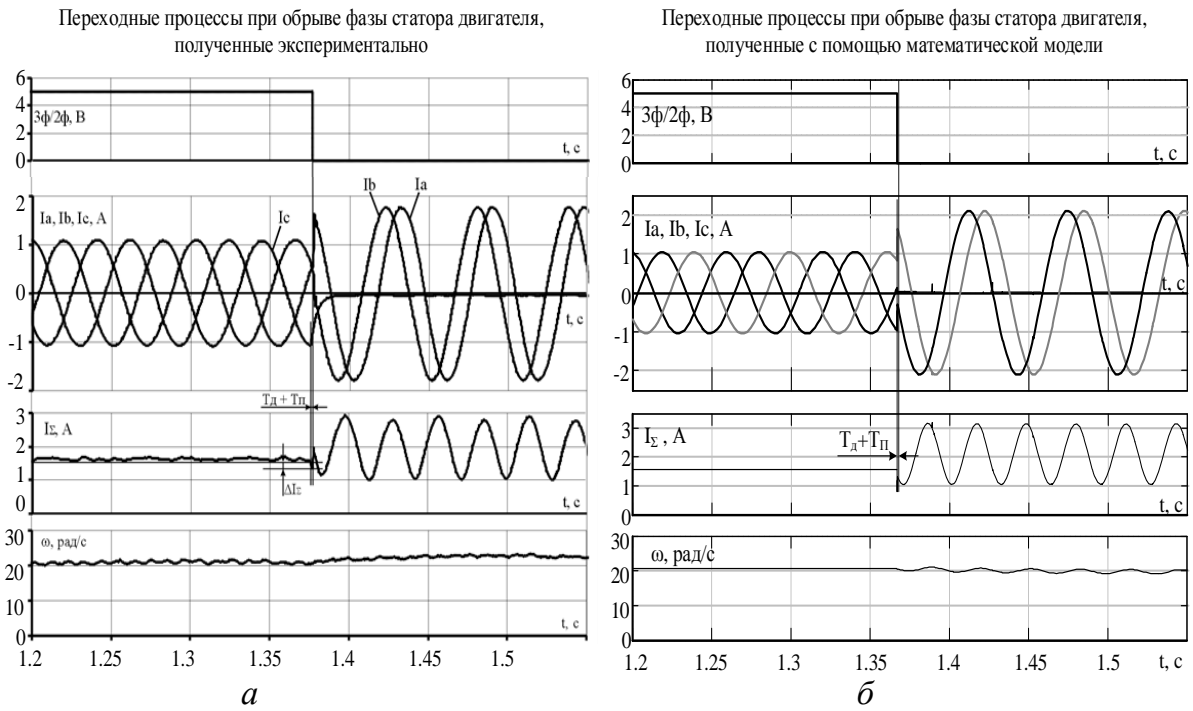


Рис. 14. Временные диаграммы переходных процессов двухфазного режима ВД с алгоритмом восстановления ($\omega = 21$ рад/с), а – эксперимент, б – модель

На рис. 15, а приведены временные диаграммы аварийных переходных процессов 14...18 оборотов вала ВД с переключением в аварийный двухфазный режим с алгоритмическим восстановлением работоспособности и без алгоритма восстановления для величин: M , I_{Σ} , α , ω , $2\phi/3\phi$ [4, 8].

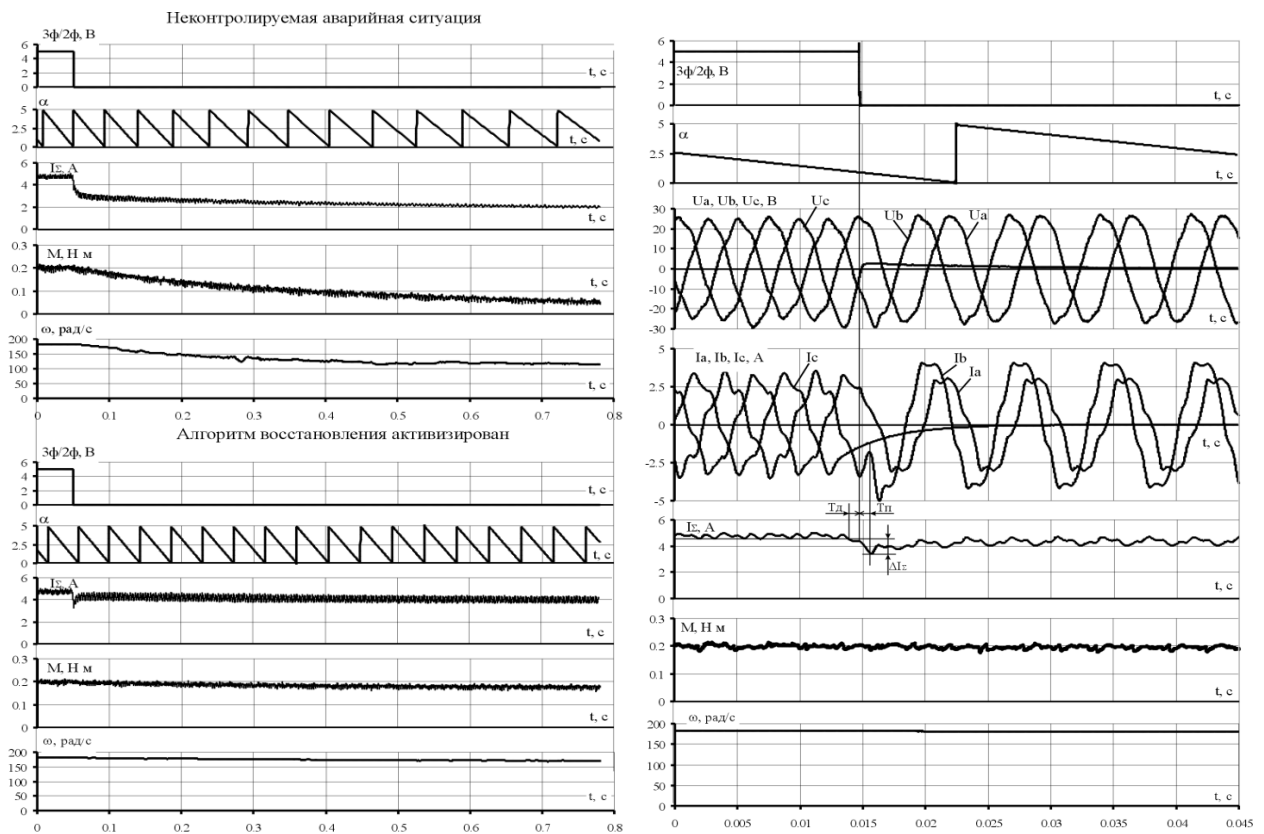


Рис. 15. Временные диаграммы аварийных переходных процессов 14...18 оборотов вала ВД (а), 1 оборот ВД с алгоритмическим восстановлением $\omega = 182$ рад/с (б)

В аварийном двухфазном режиме без алгоритма восстановления за интервал времени 0,75 с частота вращения ВД снижается практически в 2 раза, с активизацией алгоритма восстановления уменьшение частоты вращения составляет менее 10 %. На рис. 15, б приведены временные диаграммы переходных процессов в пределах одного оборота вала для трехфазного рабочего режима ВД с переходом в аварийный двухфазный режим и алгоритмическим восстановлением работоспособности по логическому сигналу «3ф/2ф» для следующих величин: фазных токов I_A, I_B, I_C ; напряжений U_A, U_B, U_C ; суммарного потребляемого тока ПЧ I_Σ ; электромагнитного момента M ; частоты ω вращения вала; сигнала датчика положения α ротора. Аварийная ситуация наблюдается в виде снижения уровня суммарного потребляемого тока ВД ниже установившегося уровня до момента аварии. С началом алгоритмического восстановления запускается процесс адаптации структуры ЭП за время T_{Π} , который заканчивается прекращением снижения и восстановлением уровня потребляемого тока. Величина отклонения тока ΔI_Σ составляет 30 % от уровня I_Σ суммарного потребляемого тока I_Σ в трехфазном режиме за время: $T_d + T_{\Pi}$, где T_d – длительность мониторинга. Процесс переключения заканчивается при достижении относительного фазового сдвига токов равного значению $\pi/3$.

При формировании пространства параметров отказоустойчивого управления ЭПТ таких технологических объектов, как насосных агрегатов долговременным внешним механическим воздействием, определяющим время межремонтного интервала для предотвращения отказов подшипникового узла ЭП, является монолитность фундаментной плиты. Очевидно, что снижение монолитности сокращает время межремонтного интервала ЭП и повышает эксплуатационные затраты. Одним из решений этой задачи является разработка алгоритмов (27), (28) для диагностики и мониторинга монолитности фундаментной плиты ЭП (рис. 16) [58, 59].

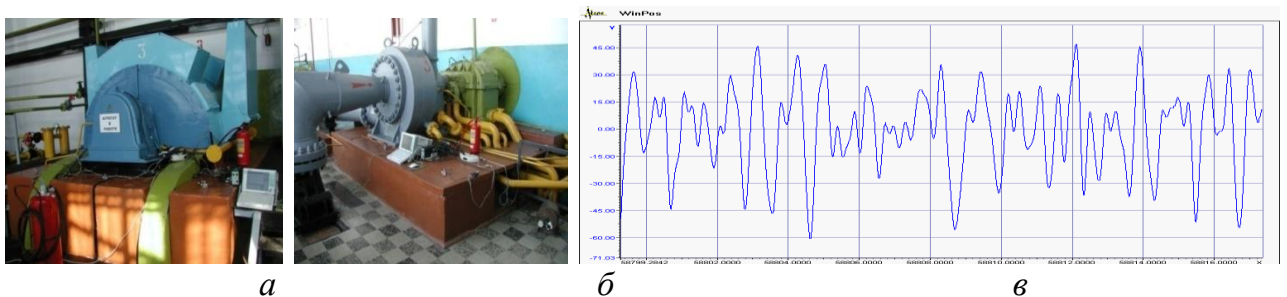


Рис. 16. Компьютерная система регистрации параметров фундамента электропривода (а), насосного агрегата (б); виброграмма горизонтальных перемещений аварийной фундаментной плиты (оси: Y – мкм, X – с) (в)

Алгоритм мониторинга фундамента [59]

Если $A_{0i} \geq A_{0\text{доп}}$, то вырабатывается бит аварийной остановки ЭП, если $A_{0i} < A_{0\text{доп}}$, то определяют величину запаса рабочего ресурса фундамента: $\delta A = A_{0\text{доп}} - A_{0i}$, при условии: $f_{\text{пер}} = K_f f_m$, $km = f_{km}/f_r$, $t_{\text{пер}} = K_t/f_0$. (27)

Алгоритм диагностики фундамента [58]

Если $A_{0i} \geq A_{0\text{доп}}$, $A_{0i-1} < A_{0i} > A_{0i+1}$, то между точками $i-1$ и $i+1$ диагностируется дефект тела фундамента, если: $A_{0i} \geq A_{0\text{доп}}$, $A_{0i-1} < A_{0i} > A_{0i+1}$, $A_{0i} / A_{0i\pm 1} > 3$, то судят об аварийности фундамента, при условии: $t_{\text{изм}} \geq 1/f_0$, $f_{\text{изм}} \geq 2f_0$. (28)

где $A_{0\text{доп}}$ – допустимое значение амплитуды горизонтальных колебаний фундамента; δA – величина запаса рабочего ресурса фундамента; A_{0i-1} , A_{0i} , A_{0i+1} – значения амплитуд горизонтальных колебаний фундамента в соседних $i-1$, i , $i+1$ точках измерения; f_0 – частота первой гармоники собственных колебаний фундамента; $t_{\text{изм}}$ – время записи измеренных значений; $f_{\text{изм}}$ – частота запуска регистрации вибродатчиков; K_f – коэффициент кратности частоты запуска ($K_f \geq 2$); f_{km} – максимальная частота диагностики повреждений ЭП с кратностью частот km ; f_r – частота вращения ротора ЭП насосного агрегата; K_t – коэффициент кратности времени запуска алгоритма мониторинга, $K_t \geq 1$. Одним из условий аварийности фундамента является: $A_{0i} \geq A_{0\text{доп}} = 50$ мкм [58]. Автоматизированная оценка состояния подшипниковых узлов ЭП и своевременного ремонта позволяет создать предпосылки увеличения, примерно на 14 %, рабочего ресурса фундаментов в процессе безопасной эксплуатации насосного агрегата.

Экспериментальные исследования по применению АД в качестве отказоустойчивого датчика для мониторинга параметров ограничителя грузоподъемности кранового АЭП механизма подъема (рис. 17) были проведены на мостовом кране МК 10.



Рис. 17. Внешний вид мостового крана МК 10 (а); регистрирующая аппаратура (б); блок-схема измерительной системы на основе косвенного метода измерения массы груза с мажоритарным резервированием информативного параметра в МК (в)

Предложено применение АД в качестве датчика для мониторинга параметров с целью ограничения грузоподъемности кранового асинхронного ЭП механизма подъема в приборах безопасности [3]. На основе математической модели и экспериментальных исследований показана возможность применения следующих информативных параметров: частоты вращения – n , активной мощности – P , токов статора – I_1 или ротора – I_2 , скольжения – s [2]. Разработаны технические решения по реализации отказоустойчивых алгоритмов ограничения грузоподъемности с применением информативных параметров [34, 38–41]. Такой подход позволяет повысить живучесть прибора безопасности в 2...8 раз за счет применения мажоритарного резервирования и обеспечить безопасную работу кранового ЭП механизма подъема.

На основе разработанных методов и алгоритмов отказоустойчивого управления в шестой главе рассмотрены способы и структуры систем отказоустойчивого управления ЭПТ.

Предложены технические решения по реализации методов отказоустойчивого управления ЭПТ для АД, ВД, ВИП [1, 6, 30, 35–37, 42–57]. Разработаны технические решения по мониторингу отказов ЭП [28, 47, 48], способы отказоустойчивого управления АД [37, 42, 45] и ВД [36, 43] ЭП, построение отказоустойчивых структур ЭП с АД и ВД, выполненных на мостовых и полумостовых ПЯ с 3Э блокировки отказа, расположенных в звене постоянного [52, 56] или переменного [51, 55] тока с подключаемыми резервными полумостоами [51, 52], для схемных решений со связанными [49, 51, 52, 56] или развязанными фазами двигателя [33, 35–37, 42–44]. Предложены схемные решения отказоустойчивого двухсекционного ВИП с повышенной живуче-

стью при одиночных и множественных отказах [46]. Применение схемы с ЗЭ в звене переменного тока [55] для m -кратно резервированного ЭП позволяет снизить число коротящих ключей в m раз.

В седьмой главе рассмотрена задача по формированию структурного и нагрузочного резервов в отказоустойчивых ЭПТ на основе применения промежуточного звена повышенной частоты.

Разработано техническое решение по формированию структурного резерва ЭП с коэффициентом избыточности $K_p \geq 2$ для ВД с секционированными обмотками двигателя и повышенной надежностью работы за счет обеспечения свободного обмена энергией между питающей сетью и нагрузкой [29]. Рассмотрено построение ЭП с повышенным нагрузочным резервом, практически пропорциональным отношению частоты сети и частоты примененного промежуточного высокочастотного звена [31]. Показано построение и управление преобразователем m -фазного напряжения для ЭПТ, позволяющее за счет алгоритмического обеспечения в звене повышенной частоты расширить диапазон регулирования напряжения электродвигателя в 2 раза [32]. Показано построение кранового ЭП с микропроцессорным ограничителем грузоподъемности, бесконтактным датчиком [28] фазного тока АД и отказоустойчивым управлением на основе избыточности информативных параметров.

В заключении изложены основные научные результаты диссертационного исследования, отражающие решение проблемы.

В приложении приведены акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы на предприятиях и организациях, в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработана методология синтеза способов и алгоритмов отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока, используемых в оборудовании опасных производственных объектов. Выполненные научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Созданы методы отказоустойчивого управления, позволяющие оценить работоспособность аварийных электроприводов переменного тока в реальном времени, и в случае наличия остаточного ресурса преобразователя частоты и исполнительного двигателя реализовать структурную адаптацию силовых цепей ПЧ к последствиям отказов с обеспечением повышенной безопасности и живучести промышленного объекта.

2. Предложены подход и общая методика разработки математических моделей электропривода переменного тока для схем подключения двигателей со связанными или развязанными фазами и работой с круговым, эллиптическим или пульсирующим магнитными полями. Это дает возможность получить количественную оценку мгновенных параметров электропривода в аварийных (неполнофазных) режимах и обеспечить необходимую эффективность алгоритмов восстановления работоспособности электропривода на основе функционального или структурного резервирования.

3. Предложена аналитическая форма записи алгоритмов восстановления работоспособности электроприводов с интегрированными битами матрицы отказов, полученных в результате мониторинга трехфазных асинхронных, вентильных и вентильно-индукторных электроприводов. Это позволяет обеспечить в реальном времени максимально быструю реакцию, соизмеримую с периодом широтно-импульсной модуляции системы управления, структурную адаптацию силовых цепей электроприво-

да и преобразователя частоты, что дает возможность полностью устранить или существенно уменьшить колебания момента и частоты вращения. В трехфазном вентильном электроприводе, выполненном на основе явнополюсной синхронной машины, не менее чем в 8 раз достигается снижение отклонения электромагнитного момента в момент аварии за счет применения функций самоорганизации управления.

4. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления на основе функций самоорганизации управления трехфазными асинхронным, вентильным и вентильно-индукторным электроприводами, обеспечивающие полное восстановление работоспособности при одиночных отказах. Для асинхронного электропривода предложены алгоритмы восстановления для частотно-токового и векторного управления с поворотом векторов тока на углы $\pi/3$, π радиан, увеличением частоты формируемых фазных токов и с формированием несинусоидальных токов в аварийном двухфазном режиме. Для векторного управления разработан алгоритм восстановления с поворотом векторов тока на угол $\pi/3$ радиан. Проведена сравнительная количественная оценка влияния единичных отказов на работу отказоустойчивых алгоритмов в аварийном двухфазном режиме. Наилучшие результаты получены для алгоритмов с опережающей фазой и сдвигом вектора тока на угол $\pi/3$, в случае скалярного управления провал по частоте вращения отсутствует, а изменения момента минимальны и не превышают 46 %, в случае векторного управления отклонения частоты вращения и момента практически отсутствуют. При применении отказоустойчивого алгоритма восстановления работоспособности трехфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме достигается минимизация суммарной реактивной мощности в аварийном режиме работы. Трехфазный вентильно-индукторный электропривод 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 позволяет поддерживать частоту вращения на уровне 89–90% от значения до момента возникновения аварии. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления для многофазных асинхронных и трехфазных секционированных вентильно-индукторных электроприводов, обеспечивающие частичное или полное восстановление работоспособности при однократных и множественных отказах с контролем исчерпания остаточного ресурса электропривода вплоть до работы на двух разноименных фазах одной или различных секций.

5. Предложены технические решения, реализующие созданные методы отказоустойчивого управления электроприводами переменного тока с асинхронным, вентильным и вентильно-индукторным двигателями. Разработаны технические решения по мониторингу отказов электроприводов переменного тока, способов отказоустойчивого управления асинхронными и вентильными электроприводами, отказоустойчивых структур асинхронных и вентильных электроприводов, выполненных на мостовых и полумостовых преобразовательных ячейках с защитными элементами блокирования отказа, расположенных в звене постоянного или переменного тока, с подключаемыми резервными полумостомами, для схемных решений со связанными или развязанными фазами двигателя. Предложены схемные решения отказоустойчивого вентильно-индукторного двухсекционного электропривода с повышенной живучестью при одиночных и множественных отказах. Применение схемы с защитными элемен-

тами в звене переменного тока позволяет для m -кратно резервированного электропривода уменьшить число коротящих ключей силового преобразователя в m раз.

6. Предложено оригинальное применение асинхронного двигателя в качестве информационного отказоустойчивого датчика для мониторинга параметров в приборах безопасности ответственных механизмов подъема. На основе математической модели и экспериментальных исследований установлена возможность использования текущих значений частоты вращения, активной мощности, токов статора или ротора исполнительного двигателя для определения безопасности применения такого класса промышленного оборудования.

7. Разработана методика оценки в реальном времени остаточного ресурса фундамента электроприводов насосных агрегатов на основе мониторинга показаний датчиков (акселерометров) и компьютерной диагностики. Методика позволяет провести автоматизированную оценку состояния подшипниковых узлов электропривода и создать предпосылки увеличения, примерно на 14 %, рабочего ресурса фундаментов в процессе безопасной эксплуатации насосного агрегата.

8. Применение методики оценки состояния фундаментов электроприводов насосных агрегатов в производственной деятельности предприятия ТНПВСЭП "Томск-СЭП" дает ежегодный экономический эффект в размере 2,6 млн руб. Использование разработанных программных продуктов для анализа аварийных состояний кранов в производственной деятельности предприятия НТЦ "Промбезопасность-ТГАСУ" дает ежегодный экономический эффект на сумму 2,9 млн руб.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Однокопылов, Г.И. Живучесть частотно-регулируемого асинхронного электропривода / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 41–45.

2. Однокопылов, Г.И. Асинхронный электропривод кранового механизма с микроконтроллерным ограничителем грузоподъемности / Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 49–53.

3. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема / Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов, Д.П. Столяров // Известия ТПУ. 2008. № 4. С. 119–124.

4. Однокопылов, Г.И. Исследование отказоустойчивого вентильного двигателя / Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 9–10/1. С. 3–10.

5. Однокопылов, Г.И. Математическая модель вентильного двигателя в аварийных и неполнофазных режимах работы / Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 9–10/1. С. 11–19.

6. Однокопылов, Г.И. Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода со свойством живучести / Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 9–10/1. С. 142–150.

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

8. Однокопылов, Г.И. Статические и динамические характеристики трехфазного вентильного двигателя со свойством живучести / Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 6. С. 36–41.

9. Однокопылов, Г.И. Живучесть асинхронных электроприводов вращательного и поступательного движения / И.Г. Однокопылов, Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, К.В. Образцов, Й. Центнер // Электричество. 2012. № 6. С. 46–51.

10. Однокопылов, Г.И. Восстановление работоспособности трехфазных электроприводов переменного тока при аварии в одной из фаз / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев // Ползуновский Вестник. 2012. № 3/2. С. 121–130.

11. Однокопылов, Г.И. Принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода на основе резервных элементов / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин // Известия ТПУ. 2013. 322. № 4. С. 133–137.

12. Однокопылов, Г.И. Отказоустойчивый многофазный асинхронный электропривод с несинусоидальными токами / Г.И. Однокопылов // Известия ТПУ. 2013. 322. № 4. С. 151–154.

13. Однокопылов, Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Известия ТПУ. 2013. 323. № 10. С. 133–137.

14. Однокопылов, Г.И. Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы / Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев // Известия ТПУ. 2013. 323. № 10. С. 138–143.

15. Однокопылов, Г.И. Отказоустойчивый асинхронный электропривод / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Ползуновский Вестник. 2013. №3. С. 157–162.

16. Однокопылов, Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы с эллиптическим полем / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. №2. С. 320–323.

17. Однокопылов, Г.И. Векторное управление отказоустойчивым асинхронным электроприводом / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. №2. С. 327–330.

18. Однокопылов, Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в аварийном режиме работы / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. №2. С. 330–333.

19. Однокопылов, Г.И. Алгоритмы отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом в неполнофазных режимах работы / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. №4. С. 188–191.

20. Однокопылов, Г.И. Восстановление работоспособности вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах / Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. №4. С. 181–184.

Статьи в изданиях Scopus и Web of Science

21. Odnokopylov, G.I. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) / Odnokopylov G.I., Bragin A.D. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014 - Vol. 66 – №. 1. – P. 1–6

22. Odnokopylov, G.I. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) / Odnokopylov G.I.,

Rozaev I.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014 – Vol. 66 – №. 1. – P. 1–7

23. Odnokopylov, G.I. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode / Odnokopylov G.I., Bragin A.D. // Applied Mechanics and Materials. – 2015 – Vol. 698. – p. 24–29

24. Odnokopylov, G.I. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode / Odnokopylov G.I., Bragin A.D. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21–23, 2015. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 – P. 1–5

25. Odnokopylov, G.I. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes / Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 – P. 1–6

26. Odnokopylov, G.I. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes / Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. // 2016 The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): proceedings, Novosibirsk, Jun 1–3, 2016. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2016 – P. 140–144

Монографии:

27. Однокопылов, Г.И. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: монография / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 С.

Патенты РФ на изобретения и полезные модели:

28. Однокопылов, Г.И. Измерительный частотный преобразователь тока. Патент РФ (SU) № 1402949 от 16.06.86 г. А.П. Зайцев, Е.Г. Городничев, В.Г. Букреев, Г.И. Однокопылов

29. Однокопылов, Г.И. Вентильный электропривод. Патент РФ (SU) № 1517701 от 11.09.87 г. А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, А.И. Муравьев, Г.И. Однокопылов, О.А. Алейников, М.П. Журавлев

30. Однокопылов, Г.И. Вентильный электропривод. Патент РФ (SU) № 1746482 от 12.06.89 г. Г.И. Однокопылов, А.П. Зайцев, Г.В. Обрусник, А.В. Петров, В.Н. Софронов

31. Однокопылов, Г.И. Преобразователь m-фазного напряжения для вентильного электропривода. Патент РФ (SU) № 1821881 от 08.12.89 г. Г.И. Однокопылов

32. Однокопылов, Г.И. Частотно-регулируемый электропривод. Патент РФ № 2014722 от 14.12.88. А.В. Миллер, Г.Я. Михальченко, Г.И. Однокопылов

33. Однокопылов, Г.И. Вентильный электропривод со свойством живучести. Патент РФ № 59905 от 08.08.06 г. Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов

34. Однокопылов, Г.И. Ограничитель грузоподъемности электрического крана. Патент РФ № 61700 от 16.10.06. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов

35. Однокопылов, Г.И. Асинхронный электропривод со свойством живучести. Патент РФ № 67354 от 16.04.07 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов.

36. Однокопылов, Г.И. Способ обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигателя. Патент РФ № 2311721 от 27.11.2007 г. Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов

37. Однокопылов, Г.И. Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя. Патент РФ № 2326480 от 04.04.07 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов

38. Однокопылов, Г.И. Устройство защиты крана от перегрузки. Патент РФ № 73322 от 09.01.08 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров

39. Однокопылов, Г.И. Устройство защиты и ограничения грузоподъемности электрического крана. Патент РФ № 74378 от 09.01.08 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров

40. Однокопылов, Г.И. Способ ограничения грузоподъемности электрического крана. Патент РФ № 2331572 от 28.12.06 г. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов

41. Однокопылов, Г.И. Способ ограничения грузоподъемности крана мостового типа. Патент РФ № 2354604 от 06.11.07 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров

42. Однокопылов, Г.И. Способ обеспечения живучести трёхфазного асинхронного электропривода. Патент РФ № 2410813 г. от 8.12.09 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, К.В. Образцов

43. Однокопылов, Г.И. Способ обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигателя на основе явнополюсной синхронной машины. Патент РФ № 2435291 от 26.08.10 г. Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов

44. Однокопылов, Г.И. Вентильный электропривод с обеспечением свойства живучести. Патент РФ № 2447561 от 30.03.11 г. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, И.Г. Однокопылов, К.В. Образцов

45. Однокопылов, Г.И. Способ управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя вращательного или поступательного движения. Патент РФ № 2460190 от 06.04.11 г. Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Й. Центнер

46. Однокопылов, Г.И. Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести. Патент РФ № 128409 от 11.12.12 г. Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, И.А. Розаев

47. Однокопылов, Г.И. Однофазный полумостовой инвертор для электродвигателя переменного тока с контролем состояния. Патент РФ № 128410 от 11.12.12 г. Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин, И.А. Розаев

48. Однокопылов, Г.И. Однотактный импульсный регулятор напряжения для вентильно-индукторного электродвигателя. Патент РФ № 128420 от 11.12.12 г. Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, А.Д. Брагин

49. Однокопылов, Г.И. Асинхронный электропривод со свойством живучести. Патент РФ № 128421 от 20.05.13 г. Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин

50. Однокопылов, Г.И. Установка для исследований режимов работы электродвигателей переменного тока. Патент РФ № 133321 от 24.05.13 г. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, А.Д. Брагин

51. Однокопылов, Г.И. Устройство обеспечения живучести асинхронного электропривода. Патент РФ № 133365 от 07.05.13 г. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, А.Д. Брагин

52. Однокопылов, Г.И. Асинхронный электропривод со свойством живучести. Патент РФ № 133366 от 10.10.13 г. Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, А.Д. Брагин

53. Однокопылов, Г.И. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя. Патент РФ № 136184 от 14.08.13 г. Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, А.Д. Брагин

54. Однокопылов, Г.И. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильно-индукторного электропривода. Патент РФ № 136185 от 20.08.13 г. Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев

55. Однокопылов, Г.И. Трехфазный асинхронный электропривод с повышенной живучестью. Патент РФ № 136652 от 01.08.13 г. Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, В.В. Толубаев, А.Д. Брагин

56. Однокопылов, Г.И. Устройство управления и обеспечения живучести двигателя двойного питания. Патент РФ № 2525294 от 07.02.13 г. Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов

57. Однокопылов, Г.И. Отказоустойчивый трехмерный электрический генератор подвижного объекта. Патент РФ № 144227 от 28.01.14 г. Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин, И.А. Розаев.

58. Однокопылов, Г.И. Способ мониторинга фундаментов электроприводов насосных агрегатов. Патент РФ № 2474801 г. от 26.08.11 г. Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, О.Г. Кумпяк, Д.Ю. Ляпунов, И.Г. Однокопылов, А.Ф. Прутик

59. Однокопылов, Г.И. Способ диагностики фундамента электропривода насосного агрегата. Патент РФ № 2485351 г. от 19.04.12. Г.И. Однокопылов, О.Г. Кумпяк, В.Г. Букреев, И.Г. Однокопылов, З.Р. Галяутдинов, О.Р. Пахмурин

60. Однокопылов, Г.И. Способ обеспечения живучести аварийного здания или сооружения и безопасности проведения ремонтно-восстановительных работ. Патент РФ № 2441967 от 13.08.2010 г. О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, О.Р. Пахмурин, З.Р. Галяутдинов, А.В. Кудряков, Ю.А. Мун

61. Однокопылов, Г.И. Способ управления повышением живучести многоэтажного панельного здания после взрывного воздействия и безопасности проведения ремонтно-восстановительных работ. Патент РФ № 2547849 от 09.01.2014 г. О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, О.Р. Пахмурин, В.С. Самсонов, З.Р. Галяутдинов, А.В. Кудряков

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ:

62. Однокопылов, Г.И. Программа расчета переходных процессов кранового асинхронного электропривода с ограничителем грузоподъемности: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611078 Российской Федерации / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. Дата регистрации 14.03.2007 г.

63. Однокопылов, Г.И. Программа расчета переходных процессов вентильного электропривода: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007614036 Российской Федерации / К.В. Образцов, Г.И. Однокопылов. Дата регистрации 21.09.2007 г.

64. Однокопылов, Г.И. Программа расчета переходных процессов асинхронного электропривода в неполнофазных и аварийных режимах работы: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613578 Российской Федерации / Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. Дата регистрации 22.08.2007 г.

Подписано в печать 19.06.2017.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс, печать офсет.
Тираж 100 экз. заказ 10.
Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.