

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра ЭПЭО

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Отказоустойчивый двухсекционный асинхронный электропривод в аварийных режимах</b>

УДК 62-527: 621.3.078.3: 621.313: 62-932: 004.052.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Г.И.	К.Т.Н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистенткафедры Менеджмента	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.	К.Т.Н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.			

Томск – 2017 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный</i> и <i>общекультурный</i> уровень, добиваться <i>нравственного</i> и <i>физического</i> совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике <i>навыки и умения</i> в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P1	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P1	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое <i>оборудование</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P1	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт - Энергетический  
 Направление подготовки - Электроэнергетика и электротехника  
 Кафедра - Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Ю.Н. Дементьев  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович

Тема работы:

<b>Отказоустойчивый двухсекционный асинхронный электропривод в аварийных режимах</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• предусмотреть мониторинг отказов типа: обрыв фазы двигателя, «невключение» и «невключение» ключа преобразователя частоты и разработать схемные решения по выявлению отказов;</li> <li>• обеспечить функционирование микроконтроллерной системы управления с алгоритмом восстановления работоспособности двухсекционного асинхронного электропривода;</li> <li>• разработать схемные решения по построению отказоустойчивого электропривода для опасного производственного объекта</li> <li>• предусмотреть функционирование электропривода с функциональным и структурным резервом.</li> <li>• разработать имитационную модель отказоустойчивого асинхронного электропривода для исследования неполнофазных и аварийных режимов работы.</li> </ul>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор технической литературы по теме отказоустойчивого асинхронного электропривода.          Моделирование асинхронного электропривода.          Технические решения по построению отказоустойчивого электропривода и алгоритмы отказоустойчивого управления.          Исследования двухсекционного асинхронного электропривода.          Заключение</p>
--	---

<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Функциональная и структурная схемы.          2. Имитационная модель.          3. Результаты исследований.</p>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кузьмина Н.Г.
«Социальная ответственность»	Дашковский А.Г.
Раздел на иностранном языке	Баластов А.В.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Введение; обзор литературы по вопросу отказоустойчивого электропривода; составление математической модели отказоустойчивого двухсекционного электропривода; заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Георгий Иванович	Кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

### «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
5ГМ5Б		Иванов Кирилл Владимирович	
<b>Институт</b>	Энергетический	<b>Кафедра</b>	ЭПЭО
<b>Уровень образования</b>	Магистрант	<b>Направление/специальность</b>	Электротехника, электромеханика и электротехнологии
<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>			
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих		1. Определить затраты на разработку проекта, в которую входят: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Материалы и покупные изделия</li> <li>- Основная заработная плата</li> <li>- Дополнительная заработная плата</li> <li>- Отчисления в социальные фонды</li> <li>- Прочие и накладные расходы</li> </ul> 2. Для исследования необходимо два человека: руководитель, студент.	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов		В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования		Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30 %	
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>			
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ		Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)	
2. Разработка устава научно-технического проекта		Не разрабатывается	
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок		Разработка календарного плана работ, сметы расходов.	
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности		Определить ресурсную и экономическую эффективность проекта.	
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>			
1. Календарный план			
2. Смета затрат			
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ			
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>			

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кузьмина Наталья Геннадьевна	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович		

## «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович

Институт	ЭНИН	Кафедра	Энергетических систем
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (подстанции и линии электропередачи).	-Исследовательская работа проводится в лабораторном кабинете, вблизи находится ПК.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме.	ГОСТ 12.0.003-74 (с измен. 1999 г.), СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, СН 2.2.4/2.1.8.556–96.

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.	<b>Вредные факторы:</b> 1) Шум от работы ПК (Packard bell B970) 2) Освещенность 3) Микроклимат
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды – пожаробезопасность – электробезопасность	В качестве основных выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды была выбрана электробезопасность.
3. Охрана окружающей среды – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);	Бытовые отходы. Отходы, образующиеся при поломке ПЭВМ, осветительных приборов.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях – выбор наиболее типичной ЧС;	- Возможные ЧС: пожар в лабораторном кабинете.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Эргономические требования к рабочему месту Контроль и соблюдение отделом охраны труда следующих мероприятий: - обучение и подготовка персонала -соблюдение социальных гарантий для работников при воздействии на них вредных и опасных факторов труда

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.	к.т.н		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович		

## **РЕФЕРАТ**

Магистерская диссертация содержит 121 страниц, рисунок 19, 16 таблиц, 43 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: отказоустойчивый асинхронный электропривод, математическая модель асинхронного двигателя, неполнофазный режим работы, обрыв фазы двигателя, отказ элементов преобразователя частоты, резервирование элементов электропривода, алгоритм восстановления работоспособности.

Цель работы – разработать алгоритм восстановления в аварийном режиме асинхронного двигателя. В среде Matlab Simulink исследовать аварийного двухфазный режим работы. Получить временные характеристики переходных процессов в неполно фазных режимах АД.

Применены расчетные методы с использованием компьютера.

Магистерская диссертация выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

Всего по данной тематике с моим участием опубликовано 4 печатных работ, в том числе получен 1 патент на полезную модель, и две публикации в журнале.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 Обзор исследуемой тематике отказоустойчивого асинхронного электропривода .....	10
1.1. Анализ известных методов обеспечения асинхронного электропривода свойством живучести .....	10
1.2 Обзор известных технических решений отказоустойчивого электропривода переменного тока.....	14
1.3. Обзор схмотехнических решений зарубежных ученых по обеспечению электропривода отказоустойчивости. ....	17
1.4 Выводы по разделу.....	19
2. Математическая модель отказоустойчивого двухсекционного асинхронного электропривода .....	20
2.1 Постановка задачи .....	20
2.2 Математическое моделирование процессов в асинхронного электродвигателе.....	20
2.3 Математическое описание электропривода.....	34
3 Выбор электродвигателя, и расчет его основных параметров.....	38
Постановка задачи .....	38
3.1 Выбор электродвигателя и расчет его параметров.....	38
3.2 Выбор способа управления двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель .....	40
3.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода .....	41
3.4 Расчет характеристик разомкнутой системы при векторном управлении .....	43
4. Исследование аварийных режимов двухсекционного электропривода.....	48
Постановка задачи: .....	48
4.1 Отказоустойчивый асинхронный электропривод с векторной системой управления .....	48
4.2 Аварийный двухфазный режим без применения алгоритма восстановления.....	49
4.3. Моделирование отказоустойчивого асинхронного электропривода.....	50
4.4 Аварийный двухфазный режим с использованием алгоритма восстановления работоспособности на основе структурного резервирования.....	52
4.5 Двухсекционный асинхронный электропривод с вентиляторной нагрузкой. ....	55
4.6 Двухсекционный асинхронный электропривод с постоянной нагрузкой .....	57
4.7. Выводы по разделу.....	60
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. ....	62
5.1 Планирование работ и их временных оценок.....	62
5.2 Расчет сметы затрат на исследование. ....	65
5.3 Расчёт материальных затрат.....	65
5.4 Расчёт затрат амортизации. ....	65
5.5 Расчёт затрат на заработную плату. ....	66
5.6 Затраты на социальные отчисления. ....	67

5.7 Накладные расходы.....	68
5.8 Определение общего бюджета затрат на научно-исследовательскую работу. ....	68
5.9 Смета необходимых материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования. ....	69
6 Соцеальная ответственность .....	71
Введение.....	71
6.1 Вредные производственные факторы .....	71
6.2 Микроклимат .....	75
6.3 Электромагнитное излучения .....	77
6.4 Опасные факторы.....	79
6.5 Поражение электрическим током .....	79
6.6 Пожароопасность .....	82
6.7 Правила поведения населения при эвакуации в случае ЧС .....	86
6.8 Выводы по главе.....	88
Список публикации:.....	89
Список литературы .....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	95

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для опасного производственного объекта развитие полупроводниковой техники дали толчок в развитии давно известных систем электроприводов в новых сферах применения. Незаменимым элементом любого производственного объекта является асинхронный электропривод. На сегодняшний день он становится все более популярен благодаря простоте, высоким энергетическим показателям и большому диапазону регулирования так же относительно небольшой цене. Такой электропривод благодаря особенностям конструкции и простоте реализации управления может найти применение во многих сферах промышленности, таких как: военная, космическая и медицинская, где предъявляются высокие требования по отказоустойчивости рабочего механизма. Так же, зачастую асинхронный электропривод, как и другие технические устройства выходят из строя. В

условиях где к электроприводам переделаются требования живучести, целесообразно рассмотреть аварийные двухфазные режимы электропривода. Целью данной работы является изучить двухсекционный электропривод со стороны его отказоустойчивости, надежности и живучести. Для выполнения работы необходимо провести анализ имеющихся методов и принципов отказоустойчивого управления двухсекционным электроприводом. Разработать математическую и имитационную модель двухсекционного электропривода для исследования аварийных и неполно фазных режимов работы, разработать алгоритмы отказоустойчивого управления для двухсекционного асинхронного электропривода, алгоритмы непрерывного мониторинга состояния системы и проверку в реальном времени остаточной работоспособности. Разработать несколько схемных решений по реализации отказоустойчивого двухсекционный асинхронного электропривода.

## **1 Обзор исследуемой тематике отказоустойчивого асинхронного электропривода**

### **1.1. Анализ известных методов обеспечения асинхронного электропривода свойством живучести**

Электропривод переменного тока (ЭПТ) построенный на основе асинхронных (АД) или вентильных двигателей (ВД) является основой построения практически всех сложных технических систем вращательного и поступательного принципа действия. Известны области применения ЭПТ, для которых прекращение функционирования может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования с риском для персонала, большим экономическим потерям при авариях на необслуживаемых объектах эксплуатации с безостановочным циклом работы в течение продолжительного времени, браку продукции при продолжительном цикле обработки деталей. По ГОСТ 27.002–89 свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность

при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов – определяется термином «живучесть». Для вышеперечисленных областей применения ЭПТ задача обеспечения свойства живучести ЭПТ становится определяющей.[1]

Существует необходимость обеспечения безопасности и отказоустойчивости электропривода в составе опасных агрегатов при транспортировке газа, нефти и продуктов их переработки. Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001. Перечень опасных производственных объектов представлен на рисунке 1.1.

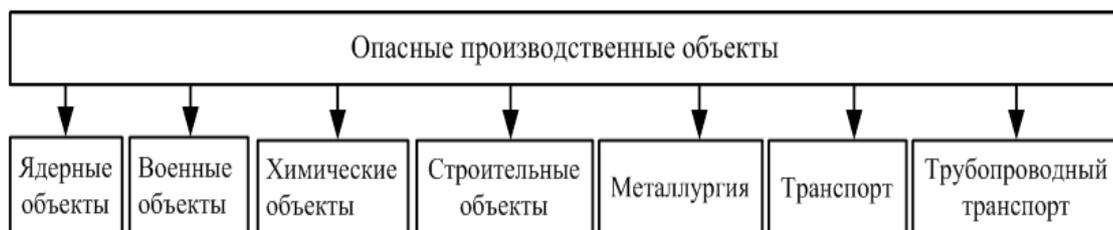


Рисунок 1.1 Опасные производственные объекты

Свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов – определяется термином «живучесть». Для вышеперечисленных областей применения ЭП задача обеспечения свойства живучести становится определяющей.[2]

Живучесть – это свойство, характеризующее способность системы эффективно функционировать при получении повреждений (отказов фаз) или восстанавливать данную способность в течении заданного времени. В нашем случае живучесть это комплексное свойство системы и оно проявляется чрез возможность «сохранять» или «восстанавливать» требуемых параметр технической системы электропривода.

Можно выделить три группы неисправностей ЭП: неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети, неисправности механической части электропривода, (включая редуктор) неисправности вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды. В таблице 1.1 представлены виды неисправности и их возможные причины.

Таблица 1.1

<p>Неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• короткое замыкание в обмотках двигателя;</li> <li>• перегрузка по току;</li> <li>• обрывы в обмотках двигателя;</li> <li>• пробой изоляции фазы обмоток на корпус;</li> <li>• обрыв питания одной из фаз;</li> <li>• возникновение неполнофазного режима электродвигателя;</li> <li>• возрастание потребляемой мощности при неизменной нагрузке на валу электродвигателя;</li> <li>• несимметрия фаз питающей сети;</li> <li>• неправильное чередование фаз;</li> <li>• снижение межвитковой и межфазной изоляции (полное или частичное междуфазное замыкание);</li> <li>• изменения частоты и напряжения питающей сети за допустимые значения;</li> <li>• чрезмерно большая частота включений;</li> <li>• отказ в функционировании микроконтроллера (непрохождение операции сам</li> </ul>
<p>Неисправности механической части электропривода</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• заклинивание подшипников;</li> <li>• стопорение ротора; заторможенный ротор;</li> <li>• включение при заторможенном роторе;</li> <li>• поломка пальцев муфты, срезание шпонки, обрыв ремня;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• повышенная вибрация;</li> <li>• износ электромагнитного тормоза;</li> </ul>
Неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды	<ul style="list-style-type: none"> <li>• возрастание температуры активных частей двигателя выше допустимой;</li> <li>• снижение «запаса по нагреву электродвигателя до нуля»;</li> <li>• температура окружающего воздуха выше допустимой;</li> <li>• срабатывание датчика влажности расположенного на статоре при попадании воды;</li> <li>• прекращение вентиляции двигателя.</li> </ul>

Аварийный двухфазный режим работы представляет большую опасность для двигателя. Токи протекающие по обмоткам статора превышают номинальные и зависят от большого числа различных факторов таких, как величина момента нагрузки, скольжения, схемы соединения обмотки и т.д. Если момент нагрузки превышает критический момент двигателя в двухфазном режиме работы, то произойдет остановка двигателя, в случае же продолжения работы может возникнуть тепловое повреждение двигателя и выход электропривода из строя.

Исходя из этого, можно заключить, что работа электродвигателя со связанными фазами в аварийном двухфазном режиме работы не допустима.

Для обеспечения работоспособности в случае наступления аварийной ситуации необходимо применить один из перечисленных на рисунок.1.2 способов исполнения отказоустойчивого электропривода.

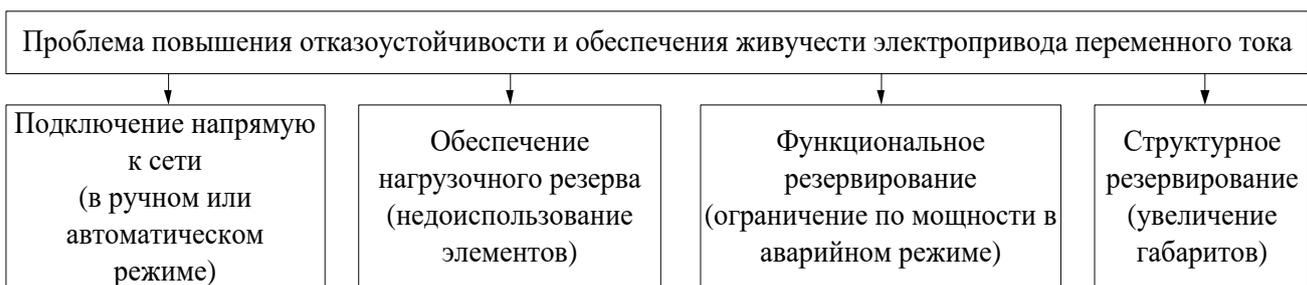


Рисунок.1.2 Способы обеспечения отказоустойчивости электропривода

## **1.2 Обзор известных технических решений отказоустойчивого электропривода переменного тока.**

Из имеющихся технических предпосылок построения системы электропривода и применения методов мехатроники можно рассматривать возможность обеспечения живучести в случае аварийного отключения одной из фаз трехфазного ЭПТ с позиций системы с ненагруженным или не полностью нагруженным резервом[2]. Из теории надежности известно, что работа систем с ненагруженным резервом очень эффективна, но имеет вполне конкретное время  $T_{п}$  переключения структуры при возникновении аварийной ситуации определяющее неуправляемую стадию процесса переключения структуры электропривода, в таком случае необходимо обеспечение временного резерва[2]

В работе предложен новый подход к обеспечению живучести ЭПТ за счет микроконтроллерного управления электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности в аварийной ситуации (в двухфазном режиме)

Известны условия существования кругового вращающегося магнитного поля в двухфазном режиме трехфазной электрической машины с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками (отказ в фазе А):  $\delta + \beta = \pi$ ;  $F_{ВМ} = F_{СМ}$ , где  $F_{ВМ}$ ,  $F_{СМ}$  – амплитудные значения магнитодвижущих сил фаз В и С;  $\delta$  – угол пространственного сдвига обмоток,  $\delta = 2\pi/3$ ;  $\beta$  – угол временного сдвига токов,  $\beta = \pi/3$ [2].

Обеспечение живучести в асинхронном электроприводе может быть достигнуто при соблюдении следующих условий в случае аварийной ситуации в одной из фаз трехфазного двигателя.

1. Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного ЭПТ как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации в одной из 3-х фаз ЭПТ может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности. При этом обеспечивается функциональное резервирование—происходит переключение структуры силовых цепей[2].

2. Силовой преобразователь ЭПТ необходимо выполнить по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам с необходимым нагрузочным резервированием.[2]



Рисунок.1.3 Преобразовательная ячейка

а - полумост,б- мост.

Важнейшим параметром является времени переключения структуры электропривода. Время переключение  $T_{п}$  необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на полупроводниковых ключах и осуществлять широтно-импульсное регулирование тока, используя только индуктивность обмоток двигателя). [2]

3. ЭП должен иметь управляющий микроконтроллер с информационным резервом по вычислительной мощности. В микроконтроллере необходимо реализовать алгоритм восстановления работоспособности в аварийной ситуации с программным формированием заданий на фазные токи. Работа

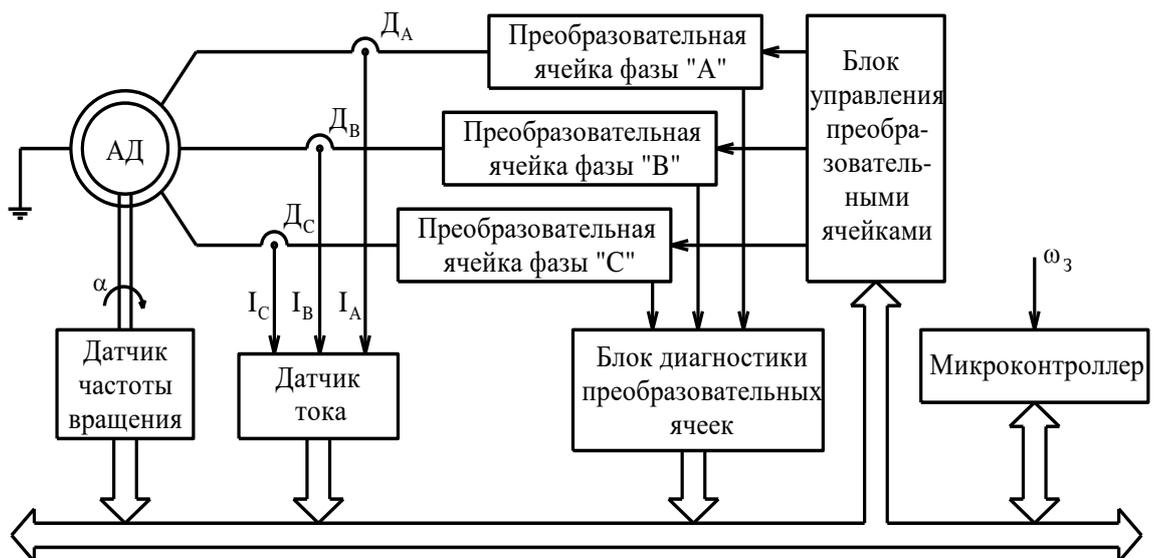
микроконтроллера осуществляется с постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя[2].

4. ЭП необходимо выполнить по принципу подчиненного регулирования и в минимальном составе должен содержать обратные связи по току. Контур тока для отработки заданного значения может быть аналоговым или цифровым. Контур обратной связи по частоте вращения непосредственно в реализации алгоритма восстановления не участвует[2].

5. ЭП должен иметь в составе силового преобразователя информационный резерв в виде датчиков состояния преобразовательных ячеек, которые вырабатывают три бита отказа а, b, с, поступающие в систему управления для отключения отказавшей фазы и реализации алгоритма восстановления. Программный опрос датчиков состояния должен осуществляться в каждом микроконтроллерном цикле управления[2].

6. В управляющем микроконтроллере должен быть заложен алгоритм, который заключается в формировании фазных токов двигателя с учетом отказавшей фазы и типа двигателя[2].

Функциональная схема односекционного частотно-регулируемого трехфазного асинхронного электропривода с обеспечением повышенной живучести в аварийном двухфазном режиме приведена на рисунок. 1.4



## Рисунок. 1.4 Функциональная схема односекционного частотно-регулируемого трехфазного асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести

Под структурным резервом понимается способ обеспечения свойства живучести асинхронного электропривода за счет микроконтроллерного управления с реализацией алгоритма восстановления работоспособности на основе резервных элементов, позволяющий полностью восстановить работоспособность при внезапных отказах преобразователя частоты типа «невключение ключа» или «невыключение ключа» преобразователя частоты.

Заданный уровень живучести в частотно-регулируемом трехфазном асинхронном ЭП может быть достигнут при выполнении следующих необходимых и достаточных условий в случае аварийной ситуации в одной из фаз преобразователя частоты:

1. Живучесть электропривода может быть обеспечена за счет структурного резервирования – возможности мониторинга системы и ее восстановление.

2. Электропривод строится на основе управляющего микроконтроллера с использованием информационного резервирования – избыточности процессорного ресурса. Работа микроконтроллера осуществляется с постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ. В результате программного анализа фазных токов вырабатывается один из трех битов отказа: прямые  $a, b, c$  и инверсные  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  биты отказов.

Изучение отказоустойчивого асинхронного электропривода со структурным резервированием отражено в следующих работах [3, 4].

### **1.3. Обзор схемотехнических решений зарубежных ученых по обеспечению электропривода отказоустойчивости.**

В Европе проблемой обеспечения отказоустойчивости как односекционных так и двухсекционных электроприводов активно занимается

Hubert Razik. Французский ученый получивший степень доктора в области электротехники и философии, 1991 окончил Политехнический институт Латарини город Нанси. А в 1993 присоединился к исследовательской группе Nancy, где в дальнейшем успешно вел преподавательскую деятельность. Он является автором или соавтором более 70 научных работ, конференций и публикаций. Его поля исследования включают моделирование, контроль и мониторинг состояния многоступенчатого асинхронного двигателя. Ниже рассмотрим решения для односекундного и двухсекционного электропривода

Подробнее рассмотрим статью «Диагностика неисправности статора с помощью оценки его параметров» (Stator Fault Diagnosis in Induction Machines by Parameter Estimation). В данной работе авторы предлагают новую модель с короткозамкнутым ротором, где асинхронных двигателей при неисправности статора отсекает аварийную часть тем самым позволяя довести технический процесс до конца. Эта модель учитывает эффекты заколачивания одного или нескольких цепей обмотки статора. Оценка параметров позволяет обнаружение и локализацию неисправностей в трех обмотках статора. Процедура диагностики основывается на данных технического процесса в режиме онлайн. Предложенное техническое решение осуществляется с помощью предварительной информации, доступной на безопасной системе, работающей в номинальном режиме [7]. Экспериментальные испытания показывают хорошие результаты.

В этой работе, возможность диагностирование короткого замыкания витков в обмотках статора, путем оценки параметров в режиме онлайн асинхронной машины [7]. Эта модель, адаптирована для различной скорости. оценка параметров он-лайн с соответствующей интеграцией физических знаний используются для выполнения обнаружения и локализации неисправностей [7].

Широкое применением двухсекционные асинхронные электропривода нашли в судостроение, (рисунок 1.5.) где от живучести электропривода зависят жизни людей [8].



Рисунок 1.5 Потребность двухсекционного асинхронного электропривод со свойством живучести в судостроение.

#### 1.4 Выводы по разделу

I. Произведен обзор и анализ, способов обеспечения отказоустойчивости электропривода переменного тока.

II. Определено, что для построения n-секционного отказоустойчивого асинхронного электропривода требуется обеспечить непрерывную мониторинг элементов преобразователя частоты и обмотки статора двигателя, организовать систему управления, содержащую алгоритм восстановления и позволяющую использовать функциональный или структурный резерв. К таким системам управления можно отнести разработанные системы векторного [2] и частотно-токового [1,2,9] управления.

III. Произведен обзор схем зарубежных исследований в области живучести, что подтверждает актуальность исследований[8].

## **2. Математическая модель отказоустойчивого двухсекционного асинхронного электропривода**

### **2.1 Постановка задачи**

Разработать модель двухсекционного отказоустойчивого асинхронного электропривода для обеспечения живучести в неполнофазных аварийных режимах работы. Для проведения таких исследований необходимо, в среде Matlab Simulink разработать математическую модель, которая позволит эмитировать как рабочее 3х фазное состояние электропривода, так и аварийный 2х фазный режим и его переходные процессы.

Математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии отличается известной сложностью. В связи с этим составление дифференциальных уравнений переходных процессов асинхронных машин является одним из важнейших этапов выполнения задачи.

### **2.2 Математическое моделирование процессов в асинхронного электродвигателе**

Для анализа многофазной электрической машины напряжение на ее обмотках должно быть синусоидальными двигателями симметричными. При анализе представим ее в двухфазной системе координат  $dq$ . Однако при исследовании несимметричных машин, при исследовании машин с учетом пространственных гармоник или при несинусоидальных напряжениях приводить машину к двухфазной неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машинах в этих условиях отличаются друг от друга [10].

При разработке модели введем понятие «идеализированная машина»: машина не насыщена, потерями в стали пренебрегаем; фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол  $120^\circ$  электрических градусов;

намагничивающие силы обмоток и магнитные поля распределены синусоидально, вдоль окружности[10].

Реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, оси фаз которой сдвинуты на фазный угол, а намагничивающая сила ее равна намагничивающей силе реальной обмотки. В случае необходимости можно отказаться от тех или иных допущений, например, могут быть учтены насыщение магнитной цепи, потери в стали, несимметрия ротора.

Для описания переходных процессов асинхронной машины, составляются уравнения:

- a. уравнение электрического равновесия:
- b. уравнение напряжений контуров,
- c. уравнение электромеханического преобразования энергии,
- d. уравнение движения электропривода.

Пространственная модель АД в естественной системе координат представлена на рисунке 2.1

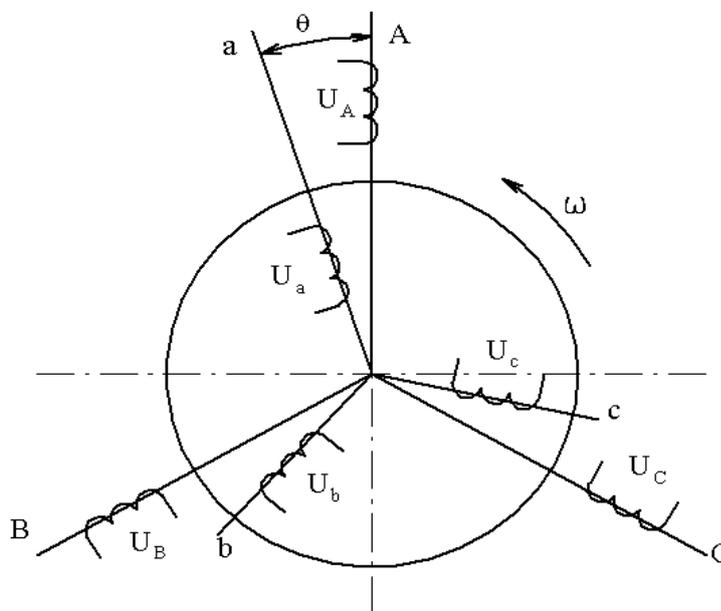


Рисунок 2.1 Пространственная модель АД в естественной системе координат.

В ней имеются три обмотки на статоре с числом витков  $w_A$ ,  $w_B$ ,  $w_C$  и три обмотки на роторе с числом витков  $w_a$ ,  $w_b$ ,  $w_c$ . Обмотки ротора вращаются с частотой  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ , а значит, взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора изменяются величину функции угла  $\theta$ .

Для определения токов в переходном процессе при заданных начальных условиях необходима система дифференциальных уравнений мгновенных фазных напряжений представленных в таблице 2.1:

Таблице 2.1:

обмоток статора(2.1)	обмоток ротора (2.2)
$U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}$	$U_a = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}$
$U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}$	$U_b = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}$
$U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}$	$U_c = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}$

Таблица 2 напряжение на обмотках, где индексы А, В, С соответствуют обмоткам статора, индексы а, b, с соответствуют обмоткам ротора. Уравнение равновесия моментов двигателя:

$$\frac{J_{\Sigma}}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c ; \quad (2.3)$$

$M$  – электромагнитный момент двигателя;

$M_c$  – статический момент сопротивления;

$J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции вращающихся масс, приведенных к валу двигателя.

Электромагнитный момент такой системы координат содержит все возможные пары произведений токов двигателя [10]:

$$M = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)].$$

Для выражения (2.2) справедливо что все роторные величины приведены к обмотке статора. Потокосцепления статора и ротора выражаются через токи фаз и индуктивности, для фазы «А» статора:

$$\Psi_A = L_{AA\Sigma}i_A + L_{AB\Sigma}i_B + L_{AC\Sigma}i_C + L_{Aa\Sigma}i_a + L_{Ab\Sigma}i_b + L_{Ac\Sigma}i_c; \quad (2.4)$$

$$\Psi_a = L_{aA\Sigma}i_A + L_{aB\Sigma}i_B + L_{aC\Sigma}i_C + L_{aa\Sigma}i_a + L_{ab\Sigma}i_b + L_{ac\Sigma}i_c. \quad (2.5)$$

Потокосцепления для оставшихся фаз записываются аналогично. Для уравнения потокосцеплений (2.4), (2.5) записаны главная индуктивность и индуктивность рассеяния:

$$\left. \begin{aligned} L_{AA\Sigma} &= L_{AA\sigma} + L_{AA}; \\ L_{BB\Sigma} &= L_{BB\sigma} + L_{BB}; \\ L_{CC\Sigma} &= L_{CC\sigma} + L_{CC}; \\ L_{aa\Sigma} &= L_{aa\sigma} + L; \end{aligned} \right\}$$

В таблице 2.3 представлены взаимные индуктивности статора и ротора.

взаимные индуктивности между фазами статора	взаимные индуктивности между фазами ротора
$L_{AB\Sigma} = L_{AB\sigma} + L_{AB}$	$L_{ab\Sigma} = L_{ab\sigma} + L_{ab}$
$L_{AC\Sigma} = L_{AC\sigma} + L_{AC}$	$L_{ac\Sigma} = L_{ac\sigma} + L_{ac}$
взаимные индуктивности между фазами статора и ротора	$L_{Aa}, L_{Ab}, L_{Ac}, L_{Ba}, L_{Bb}, L_{Bc}, \dots$

Таблица 2.3 Уравнения взаимной индукции для статора и ротора.

После приведения к обмотке статора главные индуктивности всех фаз оказываются одинаковыми и не зависящими от углового положения ротора [11]:

$$L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} = L_m, \quad (2.6)$$

где  $L_m$  – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора. Обозначим сумму взаимной индуктивности  $L_m$  и индуктивности рассеяния  $L_{AA\sigma}$  через индуктивность фазы статора  $L_S$ :

$$L_S = L_m + L_{AA\sigma}; \text{аналогично для ротора: } L_R = L_m + L_{aa\sigma}.$$

Главные взаимные индуктивности между фазами статора:

$$L_{AB}, L_{AC}, L_{BC} = -L_m / 2 \quad (2.7)$$

взаимные индуктивности между фазами ротора:

$$L_{ab}, L_{ac}, L_{bc} = -L_m / 2 \quad (2.8)$$

взаимные индуктивности равны и не зависят от углового положения ротора. Значение  $-L_m / 2$  получается при проецировании векторов токов  $I_B$  и  $I_C$  на ось фазы «А» с учетом косинуса угла.

Угол  $\theta$  можно определить как:

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega dt$$

Взаимные индуктивности являются периодическими коэффициентами. Изменяя этой величины происходит по гармоническому закону при вращательном движении ротора двигателя. Обозначим эти индуктивности через  $L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}$ :

$$\left. \begin{aligned} L_{m1} &= L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = L_m \cdot \cos(\alpha); \\ L_{m2} &= L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} = L_m \cdot \cos(\alpha + 2\pi/3); \\ L_{m3} &= L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} = L_m \cdot \cos(\alpha + 4\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Подставляя индуктивности в выражения (2.6), (2.7), (2.8) и (2.10) а так же составим уравнения потокосцеплений опираясь на выражения (2.4) и (2.5). Уравнения потокосцепления всех фаз подставим, в исходные уравнения электрического равновесия ЭМ (2.1) и (2.2), тем самым получим систему уравнений, которая описывает электромеханические процессы в асинхронном двигателе. Такие уравнения справедливы для естественной трехфазной системе

координат (с учетом, что фазных напряжений равных нулю) Системы уравнений 2.11 приведены ниже:

$$U_A = R_s \cdot i_A + L_S \frac{di_A}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_c)$$

$$U_B = R_s \cdot i_B - \frac{L_m}{2} \frac{di_A}{dt} + L_S \frac{di_B}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_c)$$

$$U_C = R_s \cdot i_C - \frac{L_m}{2} \frac{di_A}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_B}{dt} + L_S \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_c)$$

$$0 = R_r \cdot i_b + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_C) - \frac{L_m}{2} \frac{di_a}{dt} + L_R \frac{di_b}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_c}{dt}$$

$$0 = R_r \cdot i_a + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_C) + L_R \frac{di_a}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_c}{dt}$$

$$0 = R_r \cdot i_c + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_C) - \frac{L_m}{2} \frac{di_a}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_b}{dt} + L_R \frac{di_c}{dt}$$

Уравнение (2.11) содержит производные роторных токов:  $i_a, i_b, i_c$ , а также 3 производных переменных индуктивностей:  $L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}$  а также статорные токи двигателя:  $i_A, i_B, i_C$ . Для решения дифференциальных уравнений 9-го порядка (2.11) их нужно упростить и перейти с естественной (вращающейся), к заторможенной системе координат  $\alpha, \beta, \gamma$ . Данное преобразование позволяет избавиться от коэффициентов  $L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}$ , перейти в двухфазную систему координат и работать с дифференциальными уравнениями 6-го порядка. На рисунке 2.2 приведена модель в статорных осях.

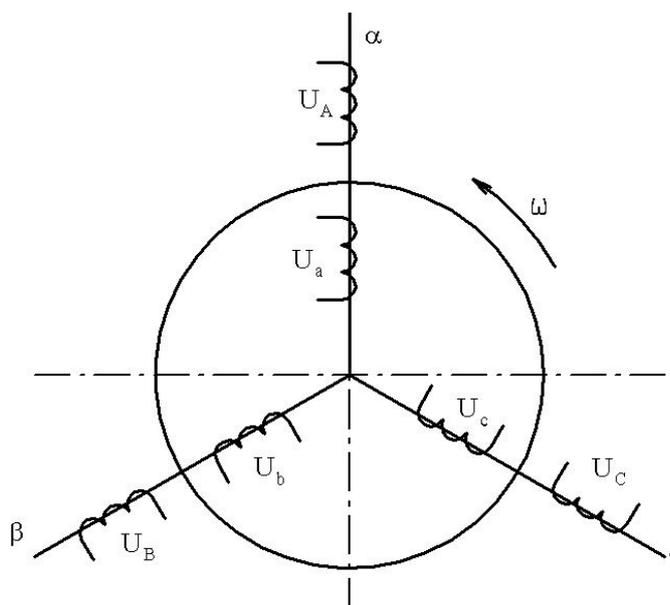


Рисунок 2.2 Пространственная модель АД в трехфазной заторможенной системе координат

В трехфазной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , так же как и в двухфазной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ , в воздушном зазоре поле круговое и его можно представить результирующими векторами токов ротора, напряжений и потокосцеплений, проецируют которые на оси статора  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  находят выражения для преобразованных значений[10]. Матрица преобразования для трехфазной системы:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + \rho) & 2/3\cos(\theta - \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta - \rho) & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta + \rho) & 2/3\cos(\theta - \rho) & 2/3\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

где  $\rho = 2\pi/3$ .

Используя матрицу преобразования (2.12), и с учетом, что фазные напряжения на роторе равны нулю, запишем систему уравнений (2.1), (2.2) в преобразованной трехфазной системе координат [11]:

$$\begin{aligned}
U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3}; \\
U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3}; \\
U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt} = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3};
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Потокосцепления для всех фаз:

$$\begin{aligned}
\Psi_A &= L_S i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_B &= -\frac{1}{2} L_m i_A + L_S i_B - \frac{1}{2} L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a + L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_C &= -\frac{1}{2} L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B + L_S i_C - \frac{1}{2} L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b + L_m i_c; \\
\Psi_a &= L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_R i_a - \frac{1}{2} L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_b &= -\frac{1}{2} L_m i_A + L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a + L_R i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_c &= -\frac{1}{2} L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B + L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b + L_R i_c.
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

Для решения уравнений (2.13) (с 6 неизвестными:  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ ,  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ), необходимо привести систему к нормальной форме Коши. Перейдем к матричной форме записи системы (2.13):

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_A}{dt} &= U_A - R_s \cdot i_A; & \frac{d\Psi_a}{dt} &= -R_r \cdot i_a - (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3} \\
\frac{d\Psi_B}{dt} &= U_B - R_s \cdot i_B; & \frac{d\Psi_b}{dt} &= -R_r \cdot i_b - (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3} \\
\frac{d\Psi_C}{dt} &= U_C - R_s \cdot i_C; & \frac{d\Psi_c}{dt} &= -R_r \cdot i_c - (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3}
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

При подробном рассмотрении неполнофазного(аварийного) режима трехфазного двигателя можно выделить два различных режима:

- Аварийная ситуация в структуре электропривода приводит к отказам в двигателе, а поле в нем становится эллиптическим(нерегулируемый электропривод)
- Работа в аварийном режиме с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля в частотно-регулируемом электроприводе [11].

В случае аварийного двухфазного режима работы двигателя можно разложить эллиптическое поле в воздушном зазоре, используя метод симметричных составляющих, на поля прямой и обратной последовательности[2]. Обобщенная модель учитывает только поле прямой последовательности. Известны два варианта модели АД, работающего с эллиптическим полем - модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и двумя роторами модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и одним ротором [2]. Первый вариант моделирования – более проста в описании, однако дает не точные результаты переходных процессах, второй вариант модели имеет более сложные выражения для результирующего электромагнитного момента, но дает наиболее точные результаты в динамических режимах работы.

Пользуясь вышеперечисленными особенностями моделирования асинхронного двигателя, выбираем модель с двумя статорами и двумя роторами схема данной модели представлена на рисунке 2.3.

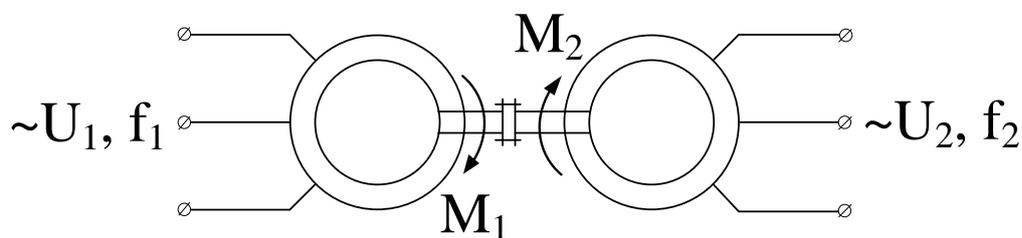


Рисунок 2.3 Схема электрической машины с двумя статорами и двумя роторами

При исследовании несимметричных машин с учетом пространственных гармоник или при наличии несинусоидальных питающих напряжений приводить машину к двухфазной неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин в этих условиях отличаются друг от друга [10]. Так как при возникновении аварийной ситуации АД является не симметричным моделирование будет выполняться в трехфазной системе координат.

В качестве эталона принята модели асинхронного двигателя в заторможенной системе координат. Для упрощения расчетов уравнения для полей прямой и обратной последовательности представлены отдельными системами. При определении напряжений, подаваемых на обмотки машин, отвечающих за поля прямой и обратной последовательности, учитывалось, что при постоянном питающем напряжении  $U_1=U_A=U_B=U_C=\text{const}$  напряжения прямой и обратной последовательности зависят от скольжения [12].

Уравнения обобщенной электрической машины имеющей два статора и один ротор для поля прямой последовательности имеют вид:

$$U_{1A} = R_s \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt} ;$$

$$U_{1B} = R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_{1B}}{dt} ;$$

$$U_{1B} = R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_{1B}}{dt} ;$$

$$U_{1C} = R_s \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_{1C}}{dt} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1a} + \frac{d\Psi_{1a}}{dt} + (\Psi_{1b} - \Psi_{1c})\omega / \sqrt{3} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1b} + \frac{d\Psi_{1b}}{dt} + (\Psi_{1c} - \Psi_{1a})\omega / \sqrt{3} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1c} + \frac{d\Psi_{1c}}{dt} + (\Psi_{1a} - \Psi_{1b})\omega / \sqrt{3} .$$

Потокосцепления для всех фаз:

$$\Psi_{1A} = L_S i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c};$$

$$\Psi_{1B} = -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_S i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c};$$

$$\Psi_{1C} = -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_S i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_m i_{1c};$$

$$\Psi_{1a} = L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_R i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c};$$

$$\Psi_{1b} = -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_R i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c};$$

$$\Psi_{1c} = -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_R i_{1c}.$$

Уравнения для обратной последовательности:

$$U_{2A} = R_s \cdot i_{2A} + \frac{d\Psi_{2A}}{dt};$$

$$U_{2B} = R_s \cdot i_{2B} + \frac{d\Psi_{2B}}{dt};$$

$$U_{2C} = R_s \cdot i_{2C} + \frac{d\Psi_{2C}}{dt};$$

$$0 = R_r \cdot i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt} + (\Psi_{2b} - \Psi_{2c})\omega / \sqrt{3};$$

$$0 = R_r \cdot i_{2b} + \frac{d\Psi_{2b}}{dt} + (\Psi_{2c} - \Psi_{2a})\omega / \sqrt{3};$$

$$0 = R_r \cdot i_{2c} + \frac{d\Psi_{2c}}{dt} + (\Psi_{2a} - \Psi_{2b})\omega / \sqrt{3}.$$

Потокосцепления для всех фаз:

$$\Psi_{2A} = L_S i_{2A} - \frac{1}{2} L_m i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} + L_m i_{2a} - \frac{1}{2} L_m i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2B} = -\frac{1}{2} L_m i_{2A} + L_S i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} - \frac{1}{2} L_m i_{2a} + L_m i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2c} = -\frac{1}{2}L_m i_{2A} - \frac{1}{2}L_m i_{2B} + L_S i_{2C} - \frac{1}{2}L_m i_{2a} - \frac{1}{2}L_m i_{2b} + L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2a} = L_m i_{2A} - \frac{1}{2}L_m i_{2B} - \frac{1}{2}L_m i_{2C} + L_R i_{2a} - \frac{1}{2}L_m i_{2b} - \frac{1}{2}L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2b} = -\frac{1}{2}L_m i_{2A} + L_m i_{2B} - \frac{1}{2}L_m i_{2C} - \frac{1}{2}L_m i_{2a} + L_R i_{2b} - \frac{1}{2}L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2c} = -\frac{1}{2}L_m i_{2A} - \frac{1}{2}L_m i_{2B} + L_m i_{2C} - \frac{1}{2}L_m i_{2a} - \frac{1}{2}L_m i_{2b} + L_R i_{2c}.$$

Электромагнитные моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые полями прямой и обратной последовательности, определяются по следующим выражениям:

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{1A} i_{1c} + i_{1B} i_{1a} + i_{1C} i_{1b}) - (i_{1A} i_{1b} + i_{1B} i_{1c} + i_{1C} i_{1a})]; \quad (2.16)$$

$$M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{2A} i_{2c} + i_{2B} i_{2a} + i_{2C} i_{2b}) - (i_{2A} i_{2b} + i_{2B} i_{2c} + i_{2C} i_{2a})]; \quad (2.17)$$

Уравнение движения электропривода, учитывающее моменты прямой и обратной последовательности:

$$M_1 + M_2 - M_c = \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.18)$$

Итоговое выражения для уравнений поля прямой последовательности:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left( [R] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \right) \cdot [i_1] \right\},$$

для поля обратной последовательности:

$$\frac{d[i_2]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \left( [R] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \right) \cdot [i_2] \right\},$$

где  $[i_1]$ ,  $[i_2]$  – матрица неизвестных (токи статора и ротора прямой и обратной последовательностей);  $[U_1]$ ,  $[U_2]$  – матрица напряжений прямой и обратной последовательностей;  $[R]$  – матрица сопротивлений;  $[L_1]$ ,  $[L_2]$  – матрицы индуктивностей;  $[L_1]^{-1}$  – обратная матрица индуктивностей статора:

$$[i_1] = \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \\ i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}; \quad [U_1] = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [i_2] = \begin{bmatrix} i_{2A} \\ i_{2B} \\ i_{2C} \\ i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}; \quad [U_2] = \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ U_{2C} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R \end{bmatrix}$$

$$[L_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & 0 \end{bmatrix}.$$

При работе в номинальном (трехфазном режиме) поля обратной последовательности отсутствуют и соответственно в расчетах не участвуют.

Для имитации обрыва фазы статора необходимо в исходные выражения для уравнений поля прямой последовательности и обратной последовательности ввести матрицу отказов, позволяющую переходить в аварийный двухфазный режим работы:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ M_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

При этом нулевому состоянию переменных  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$  будет соответствовать нормальный режим работы, а единичному – обрыв соответствующей фазы статора. Тогда выражение матрицы активных сопротивлений имеет вид:  $[R_M] = (1 + k_{обр} \cdot [M]) \cdot [R]$ , где  $k_{обр}$  - коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора АД.

Окончательные выражения для уравнений полей прямой и обратной последовательности примут следующий вид соответственно:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left( [R_M] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \right) \cdot [i_1] \right\}, \quad (2.19)$$

$$\frac{d[i_2]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \left( [R_M] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \right) \cdot [i_2] \right\}. \quad (2.20)$$

Имитация обрыва фазы статора осуществляется путем приравнивания коэффициента  $M_A$ ,  $M_B$  или  $M_C$ , соответствующего отказавшей фазе, нулю. При этом на выводы обмотки машины, отвечающей за поля обратной последовательности, подается напряжение, зависящее от текущего значения скольжения, и она подключается в режиме противовключения относительно машины прямой последовательности.

## 2.3 Математическое описание электропривода

Для описания работы частотного преобразователя используем матрицы состояния:

$$[M_{\text{пч}}] = \begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ M_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где  $M_A, M_B, M_C$  - биты состояния фазы А, В и С соответственно, которые при номинальном (рабочем режиме равны 1), а при аварийном (двухфазном) обращаются в ноль.

Рассмотрим более подробно учет структурного резерва, включенного в состав преобразователя частоты. Под структурным резервом подразумевается резервные плечи преобразователя частоты, которые при аварии активизируются. Количество резервных элементов может варьироваться от 0 до  $n$ , их количество учитывается в структурной схеме. Тогда общее количество структурных элементов будет определяться по следующему выражению:

$$q_{\text{стр}} = q_0 + \sum_{i=1}^n q_i,$$

где  $q_0$  - член выражения, характеризующий отсутствие структурного резерва (всегда принимает нулевое значение),  $q_i$  -  $i$ -ый резервный элемент.

При использовании резервного элемента важно вести диагностику его работы (например вышел из строя, задействован другой фазой). Сформируем условия проверки:

$$\prod_{j=0}^{i-1} \bar{d}_j + h_{(i-1)X} + h_{(i-1)Y},$$

где  $d$  – бит, характеризующий выход из строя предыдущего ( $j$ -ого) резервного плеча из строя,  $h_{(i-1)X}, h_{(i-1)Y}$  - биты, свидетельствующие о подключении  $i-1$ -

ого резервного плеча к двум другим фазам двигателя,  $i$  – количество резервных плеч. Произведение  $\prod_{j=0}^{i-1} \bar{d}_j$  будет равно единице, если все резервные элементы до элемента  $i-1$  вышли из строя, и нулю, если хотя бы один из них находится в рабочем состоянии.

Биты  $h_{(i-1)X}$ ,  $h_{(i-1)Y}$  введены в выражения, чтобы исключить одновременное подключение резервного плеча к двум фазам. Т.к. без их использования, при уже подключенном резервном полумосте к одной из фаз двигателя и выходу из строя плеча другой фазы, система не учтет этого и произведет подключение уже задействованного резервного плеча. Проверка на подключение  $i$ -ого резервного плеча к одной из двух других фаз двигателя будет осуществляться по следующему условию:

$$1 - (h_{iX} + h_{iY}),$$

где  $h_{iX}, h_{iY}$  - биты, свидетельствующие о подключении  $i$ -ого резервного плеча к двум другим фазам двигателя.

Используя вышеперечисленные условия можно записать итоговые выражения для подключения резервных элементов к каждой из фаз двигателя:

$$Q_A = \bar{a} \cdot (q_0 + \sum_{i=1}^n q_i \cdot (1 - (h_{iB} + h_{iC}))) \cdot (\prod_{j=0}^{i-1} \bar{d}_j + h_{(i-1)B} + h_{(i-1)C}),$$

$$Q_B = \bar{b} \cdot (q_0 + \sum_{i=1}^n q_i \cdot (1 - (h_{iA} + h_{iC}))) \cdot (\prod_{j=0}^{i-1} \bar{d}_j + h_{(i-1)A} + h_{(i-1)C}),$$

$$Q_C = \bar{c} \cdot (q_0 + \sum_{i=1}^n q_i \cdot (1 - (h_{iA} + h_{iB}))) \cdot (\prod_{j=0}^{i-1} \bar{d}_j + h_{(i-1)A} + h_{(i-1)B})$$

где  $a, c, b$  – значения бита слова состояния соответствующего плеча преобразователя частоты.

Функция описывает состояние преобразователя частоты его резервных плеч. В случае аварийной ситуации, например, в фазе А, происходит подключение первого резервного плеча и возобновление нормальной работы электропривода. При выходе из строя первого резервного плеча, согласно

матрице состояния резервных полумостов, к аварийной фазе подключается вторая преобразовательный мост. При возникновении неисправности в другой фазе преобразователя частоты, в первую очередь проверяется на подключение  $i$ -го резервного плеча к какой-либо из фаз и, в случае, если он не используется или не вышел из строя, он вводится в работу в замен отказавшего ключа преобразователя частоты. В общем случае структурный резерв преобразователя частоты составляют  $n$  ключей, для варианта при котором структурный резерв не используется, оператор  $q_0$  обнуляет функцию.

Для записи матрице состояния учтем матрице состояний, матрицу номинальной работы и изменения структуры ЭП ( $[M_{пч}]$ ,  $[M]$ ,  $[Q]$ ):

$$[F] = [M_{пч}] \cdot [M] + [Q].$$

Каждая фаза преобразователя частоты представлена передаточной функцией:

$$W_{пч}(p) = \frac{k_{пч}}{T_{пч}p + 1},$$

где  $T_{пч}$  - эквивалентная постоянная времени преобразователя  $k_{пч}$  - коэффициента усиления преобразователя.

Обобщенное выражение для формирования напряжения питания электродвигателя, используя матрицу состояний преобразователя частоты

можно записать 
$$[U] = \frac{k_{пч}}{T_{пч}p + 1} \cdot [U_{зад}] \cdot [F],$$

где  $[U_{зад}]$  – матрица управляющих сигналов, поступающая с выхода регулятора тока.

Используя полученные выражения можно представить математическую модель асинхронного электропривода со свойством живучести в виде структурной схемы (рисунок 2.3).

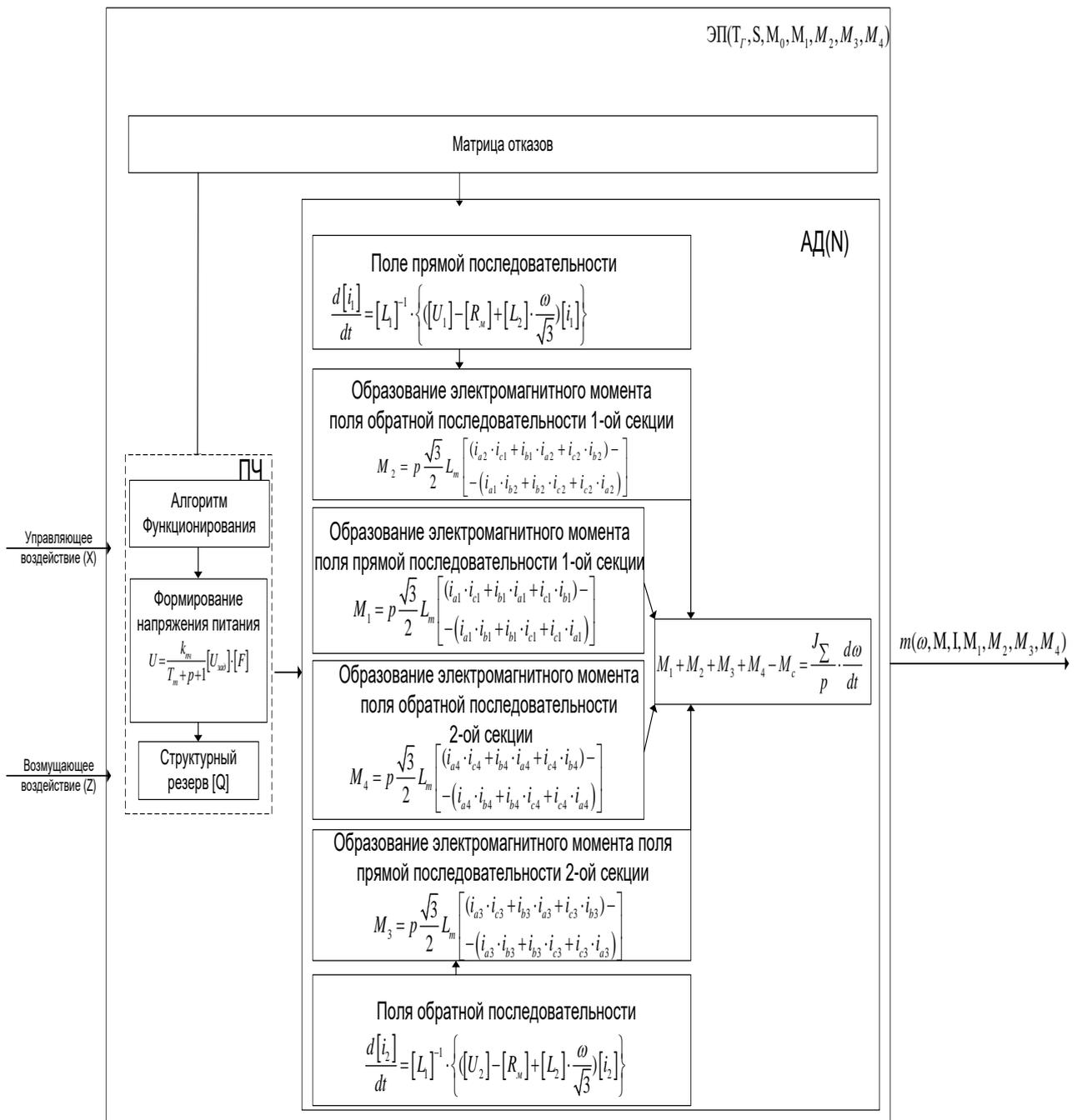


Рисунок 2.4. Структурная схема математической модели асинхронного электропривода со свойством живучести

### 3 Выбор электродвигателя, и расчет его основных параметров

#### Постановка задачи

Для обеспечения двухсекционной машины свойством живучести необходимо подобрать электродвигатель, и рассчитать его статические и динамические характеристики для трехфазном режиме и неполнофазном режиме. При разработки модели в среде Matlab Simulink требуется рассчитать параметры схемы замещения, а так же знать тип нагрузки и способ управления

#### 3.1 Выбор электродвигателя и расчет его параметров

При выборе электродвигателя учитывались такие параметры как возможность обеспечить развязку всем 6 фазам отдельно и управлением этими фазами, а так же габаритные размеры и цена. Таким критериям подходит электродвигатель серии АИР63А2 220\380 мощность 370 Вт. Паспортные данные и внешний вид электродвигателя АИР63А2 представлены в таблице 3.1, и рисунке 3.1.

Таблица 3.1.

Номинальная мощность $P_{ном}$ , кВт	0,37
Номинальный ток статора, А	1.63
КПД, %	0,72
$\cos\varphi$ , о.е.	0,84
Номинальное напряжение ротора, В	380
Номинальный ток ротора, А	0,9
Масса, кг	5,2
Момент инерции, кгм <sup>2</sup>	0,00046



Рис. 3.1– электродвигатель АИР63А2на напряжение 220/380В

Параметры схемы замещения электродвигателя, таблица 3,2-3.4.

Таблица.3.2

$m_{\Pi} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{К}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{Н}}}$	Степень защиты	$s_{\text{К}}, \%$
2,2	2,2	IP44	45

Таблица 3.3

$R_1', \text{ Ом}$	$X_1', \text{ Ом}$	$X_{\mu}', \text{ Ом}$	$R_2'', \text{ Ом}$	$X_2'', \text{ Ом}$
23,92	19,28	285,96	23,12	24,83

Таблица 3.4

$R_1, \text{ Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{ Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{ Гн}$	$X_{\mu}, \text{ Ом}$	$L_{\mu}, \text{ Гн}$	$R_2, \text{ Ом}$	$X_{2\sigma}', \text{ Ом}$	$L_{2\sigma}', \text{ Гн}$	$X_{\text{КН}}, \text{ Ом}$
2	1	0,0	2	0	2	2	0,0	44
3,92	9,28	614	85,96	,9107	3,12	4,83	79	,11

### 3.2 Выбор способа управления двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Основные способы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом и их показатели приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Способы управления в системе ПЧ-АД и их показатели:

Способ управления	Диапазон регулирования скорости
<p><b>Скалярное управление, закон управления</b>  <math>U_1 / f_1 = const :</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- разомкнутая система, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики;</li> <li>- замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора (IR-компенсация или компенсация нагрузки);</li> <li>- замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора и повышением жесткости статических характеристик (IR-компенсация и компенсация скольжения);</li> <li>- замкнутая система с обратной связью по скорости;</li> </ul>	<p>менее 10</p> <p>10</p> <p>более 10</p> <p>до 120</p>
<p><b>Векторное управление:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- без датчика скорости (с внутренней моделью)</li> <li>- с датчиком скорости</li> </ul>	<p>100–120</p> <p>1000</p>

Исходя из вышеприведенных данных используем способ управления – векторное управление с диапазон регулирования 20 и датчиком скорости.

Использование векторного управления повысит энергетические показатели электропривода, а также обеспечить работоспособность в случае возникновения аварийной ситуации и продолжить работу в неполнофазном режиме.

Принцип векторного управления основан на постоянной ориентации системы координат по направлению какого-либо вектора, что позволяет приравнять проекцию этого вектора на другую ось декартовой системы координат к нулю. Система управления вырабатывает сигналы управления во вращающейся двухфазной системе координат, которые затем преобразуются в трехфазную систему для управления преобразователем частоты.

### **3.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода**

В силовой канал электропривода входят:

- a) преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- b) электродвигатель, который выполняет функцию электромеханического преобразователя;
- c) механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

Расчет параметров преобразователя выполним по следующим выражениям:

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя:

$$k_{\text{и}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi}}{U_{\text{уп макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,02$$

где  $U_{\text{уп макс}} = 10 \text{ В}$ , – максимальное значение напряжения управления:

$$f_{\text{ШИМ}} = 3 \text{ кГц}$$

Принимаем несущую частоту инвертора. Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{и} = \frac{0,5}{f_{и}} = \frac{0,5}{3 \cdot 10^3} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

где  $f_{и}$  – несущая частота инвертора, Гц.

Эквивалентная индуктивность обмоток:

$$\text{статора: } L_1 = L_{1\delta} + L_{\mu} = 0,0614 + 0,9107 \cong 0,9721 \text{ Гн}$$

$$\text{ротора: } L_2' = L_{2\delta}' + L_{\mu} = 0,0791 + 0,9107 \cong 0,9898 \text{ Гн}$$

$$\text{Коэффициент рассеяния: } \sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0,9107^2}{0,9721 \cdot 0,9898} = 0,138$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{\text{э}} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2'^2} = 23,9232 + 21,1188 \cdot \frac{0,9107^2}{0,9898^2} = 41,8015 \text{ Ом}$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{\text{э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{\text{э}}} = \frac{0,138 \cdot 0,9721}{41,8015} = 0,0032 \text{ с}$$

$$T_2 = \frac{L_2'}{R_2'} = \frac{0,9898}{21,1188} = 0,0469 \text{ с}$$

Момент инерции механизма и эквивалентный момент инерции привода рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

Момент инерции механизма:

$$J_{\text{м}} = 0,5 \cdot J_{\text{дв}} = 0,5 \cdot 0,00046 = 0,00023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Эквивалентный момент инерции привода:

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} = 0,00046 + 0,00023 = 0,00069 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

При решении задач работы в трехфазном регулируемых асинхронных электроприводах обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат (x, y). Входными величинами

структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя  $U_{\text{УПХ}}$  и  $U_{\text{УПУ}}$ , а выходной величиной – угловая скорость двигателя  $\omega$ .

### 3.4 Расчет характеристик разомкнутой системы при векторном управлении

При векторном управлении магнитный поток поддерживается: в первой зоне постоянным  $\psi_{2X} = \psi_{2XH} = const$ , а во второй зоне ослабляется в соответствии с зависимостью  $\psi_{2X} = \psi_{2XH} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{НАЧ}}}$ , где  $\omega_{\text{НАЧ}}$  – начальная скорость ослабления поля. Механическая характеристика  $M=f(s)$  системы ПЧ – АД рассчитывается для частоты  $f_{\text{и}} = f_{\text{иН}} = 50$  Гц по выражению

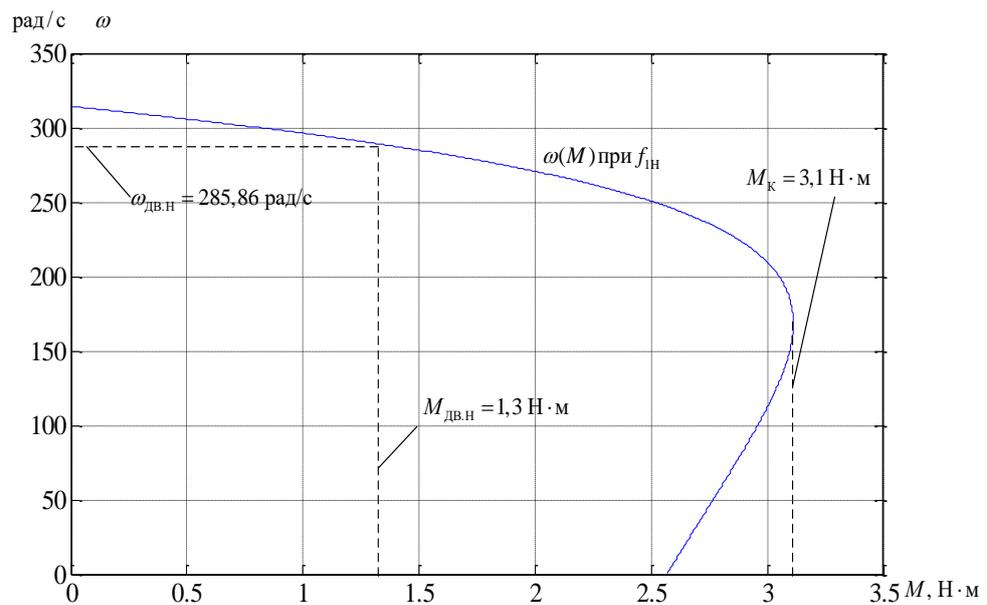


Рисунок.3.2 Механическая характеристика системы ПЧ – АД

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{ФН}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{\text{КН}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

Задаемся скольжением в пределах  $S = 0.01, 0.02, \dots, 1$  и рассчитываем характеристику  $M=f(s)$  (рисунок.3.2), где  $\omega = \omega_0 \cdot (1-s)$ .

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{ЭМ Н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{ФН}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{Н}} \cdot \left[ (X_{\text{КН}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{Н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{Н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 23,12}{314,14 \cdot 0,077 \cdot \left[ (44,11)^2 + \left( 23,9232 + \frac{21,1188}{0,09} \right)^2 + \left( \frac{23,9232 \cdot 21,1188}{0,09 \cdot 285,86} \right)^2 \right]} = 1,495 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент трения на валу двигателя

$$M_{\text{С ДВ}} = M_{\text{ЭМ Н}} - M_{\text{ДВ Н}} = 1,495 - 1,3 = 0,195 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Электрохимическая характеристика  $I_1(s)$  разомкнутой системы рассчитывается для значения частоты  $f_{\text{и}} = f_{1\text{Н}} = 50$  Гц

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} = \sqrt{0,67^2 + 0,7718^2 + 2 \cdot 0,67 \cdot 0,7718 \cdot 0,1552} = 1,062 \text{ А},$$

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{ФН}}}{\pm \sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{Н}}} \right)^2 + (X_{\text{КН}})^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left( 23,92 + \frac{23,12}{0,09} \right)^2 + (44,11)^2 + \left( \frac{23,92 \cdot 23,12}{0,09 \cdot 285,96} \right)^2}} = 0,7718 \text{ А};$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{\text{КН}}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{Н}}} \right)^2 + (X_{\text{КН}})^2}} = \frac{44,11}{\sqrt{\left( 23,92 + \frac{23,12}{0,09} \right)^2 + (44,11)^2}} = 0,1552;$$

$$I_0 = \frac{U_{1\text{ФН}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{\mu})^2}} = \frac{220}{\sqrt{23,92^2 + (19,28 + 285,96)^2}} = 0,67 \text{ А}.$$

По результатам расчета строится электрохимическая характеристика  $\omega(I_1)$  (рисунок. 3.3).

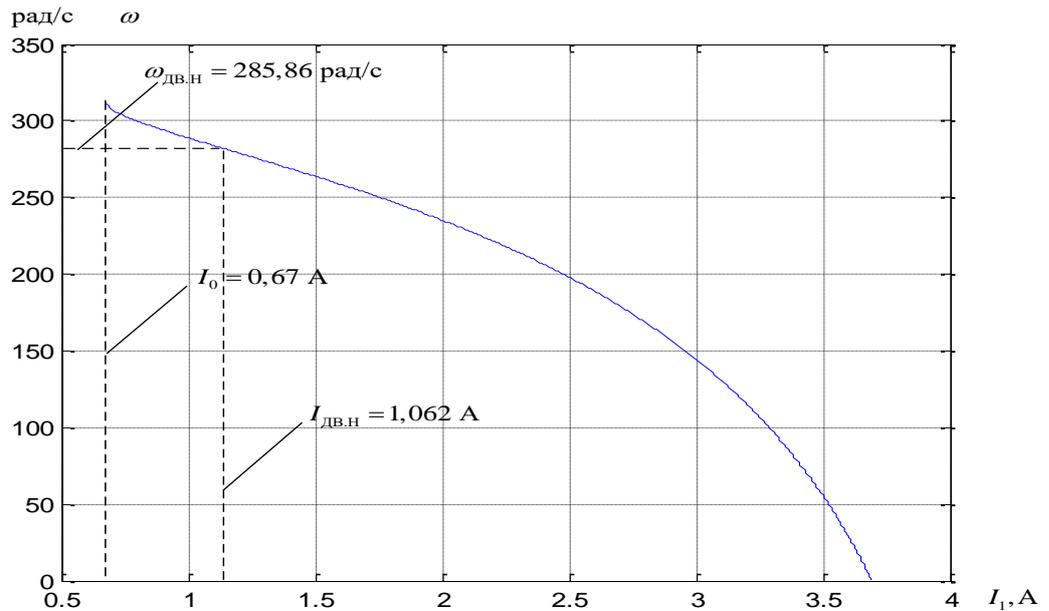


Рисунок. 3.3 Электромеханическая характеристика разомкнутой системы

Определение заданной области работы:

1. В плоскости механических характеристик  $\omega (M)$  (рис. 2.10) наносятся граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{C \text{ МИН}}(\omega) = 0,06 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{C \text{ МАКС}}(\omega) = 0,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{ЭП \text{ МАКС}}(\omega) = 2,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого момента электродвигателя  $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$ :

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}}\right) \quad \text{при} \quad \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \quad \text{при} \quad 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}} = 291,14 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad \text{при} \quad 0,5 \omega_{\text{дв.н}}.$$

3. Рассчитывается и строится зависимость максимально допустимого момента  $M_{\text{дв.макс}}(\omega)$ :  $M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_{\text{к}} \Big|_{f_{\text{и}} = f_{\text{и}}} = \text{const}$ , в зоне работы с номинальным потоком при  $f_{\text{и}} \leq f_{\text{и}}$  и  $\omega \leq \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{к}})$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{KH}^2) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_2'}{X_\mu} \right)^2 \right]} \right\}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,14 \cdot \left\{ 23,92 + \sqrt{(23,92^2 + 23,12^2) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{23,12}{285,96} \right)^2 \right]} \right\}} = 3,11 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. В плоскости электромеханических характеристик  $\omega(I_1)$  (рисунок 2.11) рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого тока электродвигателя  $I_{\text{дв, длит. доп}}(\omega)$ :

$$I_{\text{дв, длит. доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \cdot \left( 0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{двн}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}};$$

$$I_{\text{дв, длит. доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}} < \omega \leq \omega_{\text{двн}};$$

$$I_{\text{дв, длит. доп}} = I_{\text{двн}} = 1,062 \text{ А при } 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}} < \omega \leq \omega_{\text{двн}}.$$

5. Рассчитывается и строится зависимость  $I_{\text{с макс}}(\omega)$ , соответствующая длительно максимальной нагрузке  $M_{\text{с макс}}(\omega) = \text{const}$ . Для этого необходимо на естественной характеристике  $M(\omega)$  определить соответствующее  $M_{\text{с макс}}$  значение скольжения  $S_{\text{Т5}}$ , решив относительно  $S$  уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{KH})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = M_{\text{с макс}},$$

и далее рассчитать значение тока  $I_{\text{с макс}} \Big|_{f_{\text{н}}=f_{\text{н}}}$  и скорости  $\omega_{\text{Т5}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{Т5}})$ .

Зависимость  $I_{\text{с макс}}(\omega)$  рассчитывается по выражениям:

$$I_{\text{с макс}}(\omega) = I_{\text{с макс}} \Big|_{f_{\text{н}}=f_{\text{н}}} \text{ при } \omega \leq \omega_{\text{Т5}};$$

$$I_{\text{с макс}}(\omega) = I_{\text{с макс}} \Big|_{f_{\text{н}}=f_{\text{н}}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{Т5}}} \text{ при } \omega > \omega_{\text{Т5}}.$$

Решив уравнение относительно  $s$ , получаем  $s = s_{\text{Т5}} = 0,032$ . Тогда

$$\omega_{\text{Т5}} = 314,14 \cdot (1 - 0,032) = 303,968 \text{ рад/с}, \quad I_{\text{с макс}}(\omega_{\text{Т5}}) = 0,7428 \text{ А}.$$

6. Рассчитывается и строится зависимость  $I_{ЭП\text{ МАКС}}(\omega)$ , соответствующая кратковременной максимальной нагрузке  $M_{ЭП\text{ МАКС}}(\omega)=\text{const}$ . Для этого необходимо на естественной характеристике  $M(\omega)$  определить соответствующее  $M_{ЭП\text{ МАКС}}$  значение скольжения  $S_{T,14}$ , решив относительно  $S$  уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1ФН}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{кН})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2 \right]} = M_{ЭП\text{ МАКС}},$$

Решив уравнение относительно  $S$ , получаем  $S = S_{T,5} = 0,17$ . Тогда  $\omega_{T5} = 314,14 \cdot (1 - 0,17) = 259,66 \text{ рад/с}$ ,  $I_{ЭП\text{ МАКС}}(\omega_{T5}) = 1,58 \text{ А}$ .

По результатам расчета можно построить механическую характеристику электропривода при векторном управлении;

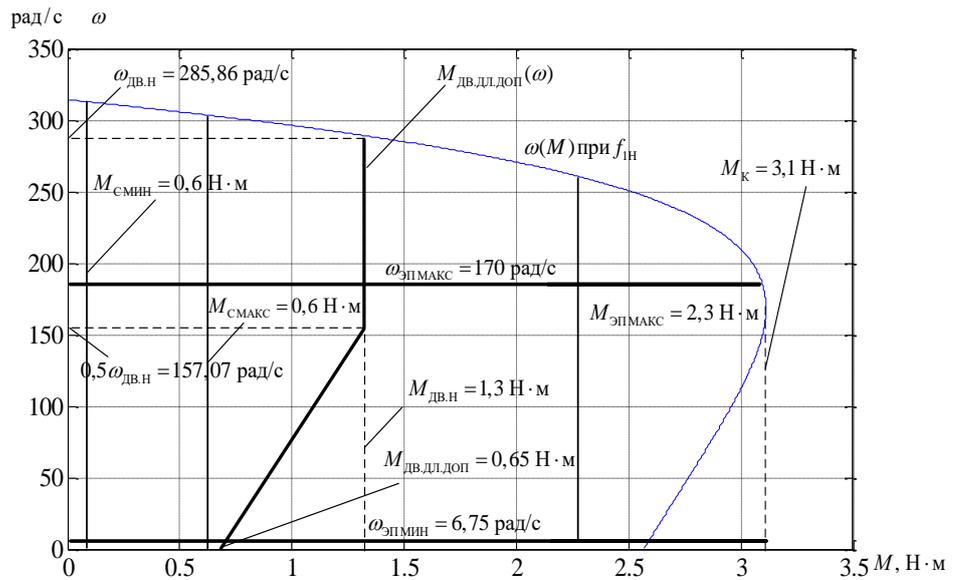


Рисунок. 3.4. Механические характеристики электропривода и нагрузки при векторном управлении

## **4. Исследование аварийных режимов двухсекционного электропривода**

### **Постановка задачи:**

В данной главе рассмотрены аварийные (неполнофазные) режимы асинхронного электропривода, и различные способы управления в аварийном режиме, с целью выявления наиболее эффективного алгоритма восстановления. Математическая модель разработанная в системе MatlabSimulink позволит графически наблюдать переходные процессы в АД а также выявить наиболее эффективный способ управления. С помощью модели можно варьировать нагрузкой электропривода, и наблюдать переключения структуры электропривод (Рисунок 4.1,4.2,4.3.).

### **4.1 Отказоустойчивый асинхронный электропривод с векторной системой управления**

Принцип векторного управления основан на постоянной ориентации системы координат по направлению какого-либо вектора, что позволяет приравнять проекцию этого вектора на другую ось декартовой системы координат к нулю [13]. Система управления вырабатывает сигналы управления во вращающейся двухфазной системе координат, которые затем преобразуются в трехфазную систему для управления преобразователем частоты, так же используя разные типы нагрузок.

Важным условием являться режим работы электропривода. Длительным называют режим работы, при котором рабочий период электродвигателя настолько велик, что нагрев последнего достигает своего стабильного состояния. При таком режиме работают двигатели вентиляторов, насосов и других механизмов непрерывного действия. В случае вентиляторной нагрузке при аварийной ситуации ее можно снизить на 30-40% что позволит

электроприводу сохранить работоспособность на более длительный срок. Так же для случая с векторным управлением рассмотрена модель двухсекционного электропривода при постоянной нагрузке на валу. Такие электроприводы используют металлургической и горной промышленности.

#### 4.2 Аварийный двухфазный режим без применения алгоритма восстановления

На рисунке 4.1 представлены переходные процессы по току, скорости и моменту, протекающие в электродвигателе в случае возникновения аварии без использования алгоритма восстановления.

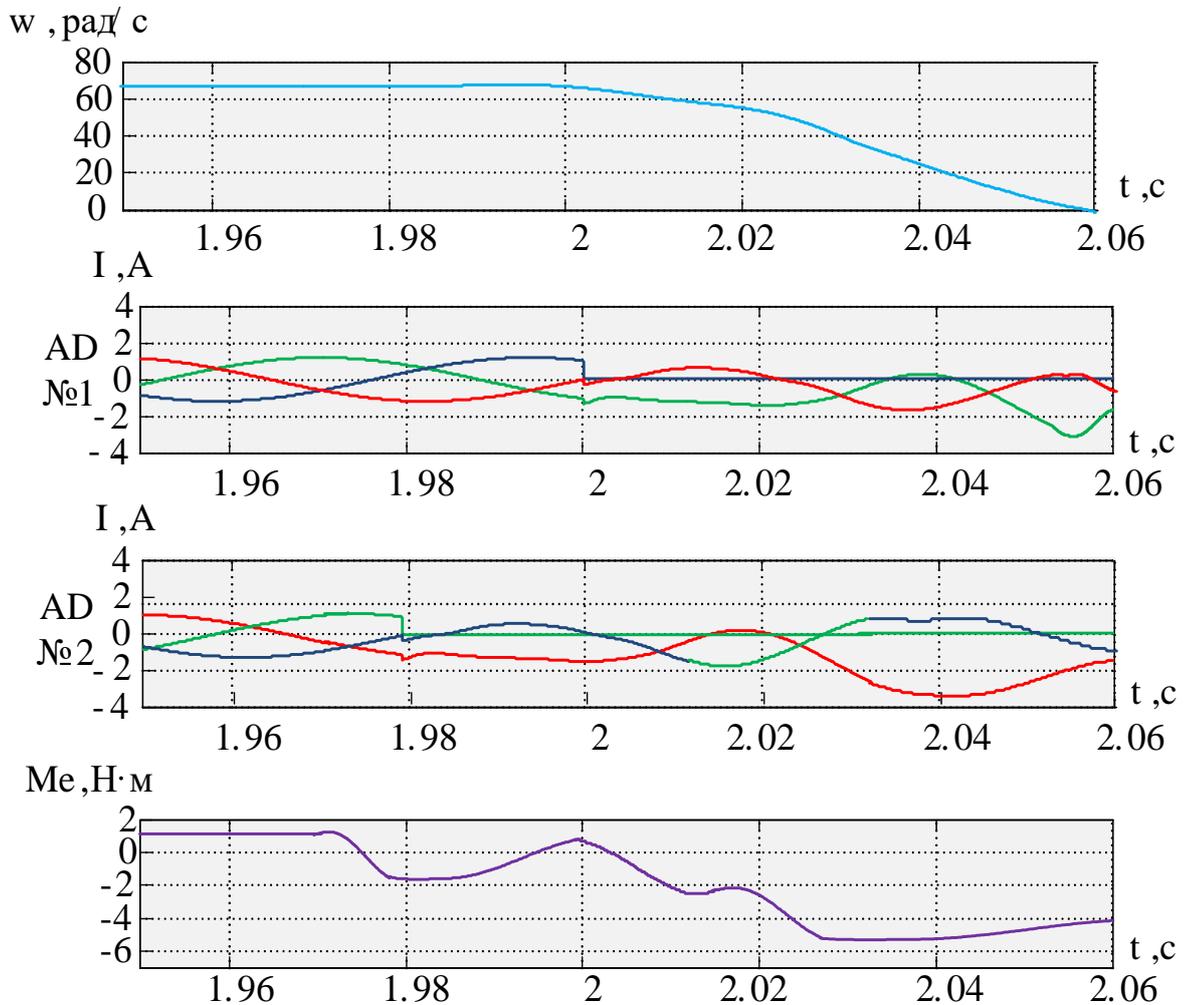


Рисунок 4.1 Переходные процесс в электроприводе с векторным управлением при обрыве фазы статора

На основе разработанной имитационной модели и системе векторного управления произведем моделирование аварийной ситуации типа обрыв фазы в среде MatlabSimulink. Из приведенных переходных процессов (рисунок 4.1) видно, что в случае возникновения аварийной ситуации происходит увеличение токов, протекающих по обмотке статора, и опрокидывание двигателя, при этом электромагнитный момент меняет свой знак, т.е. становится тормозным. Изменение электромагнитного момента определяется следующими факторами: в воздушном зазоре машины возникает эллиптическое поле, которое уменьшает перегрузочную способность и создает дополнительный тормозной момент. Второй причиной является некорректная работа системы управления, которая рассчитана для трехфазного режима.

Так образом, при переходе в двухфазный режим при подключенной точке соединения обмоток статора двигателя к нейтрали источника питания сумма токов статора становится не равной нулю, что ведет к неверному координатному преобразованию в прямом координатном преобразователе. Все вышеперечисленные особенности приводят к неработоспособности двухсекционного электропривода в двухфазном режиме работы.

Исходя из вышеперечисленного можно утверждать что двухсекционный электропривод не обладающий свойством живучести в аварийной ситуации малоэффективен для опасного производственного объекта.

### **4.3. Моделирование отказоустойчивого асинхронного электропривода**

Для моделирования был выбран двигатель АИР63А2. Оптимизация контуров производилась согласно методике, представленной в [40,41,42]. Расчет модели проводился в среде Matlab Simulink.

На рисунке. 4.1-4,6 представлены переходные процессы по току, скорости и моменту, в случае возникновения аварийной ситуации с использованием

алгоритма восстановления в электроприводе с векторным управлением.

Проведено моделирование в среде MatlabSimulink для:

1. Двухсекционного электропривода в аварийном режиме типа (3ф+2ф),(2ф+2+)с применением функционального резервирования
2. Двухсекционного асинхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой.
3. Двухсекционного асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой.

В таблице 4.1 рассмотрены варианты аварийных ситуаций:

Таблица 7  АД1	$I_{1,кра}$	2фазы электродвигателя 2 фазы электродвигателя 1 фазы электродвигателя
	$I_{2,зел}$	
	$I_{3,син}$	
АД2	$I_{1,кра}$	3 фазы электродвигателя 2 фазы электродвигателя 2 фазы электродвигателя
	$I_{2,зел}$	
	$I_{3,син}$	

Анализируя приведенные данные можно выделить алгоритмы, восстановления двухсекционного асинхронного электропривода для различных случаев номинальной нагрузки. На рисунке 4.2 представлены переходные процессы при обрыве фазы статора и активации структурного резерва, увеличение токов. Рассмотрено подключение резервного полумоста при исполнении двигателя с развязанными фазами. Время восстановления составляет 20 мс. Провал частоты вращения на время потери работоспособности электропривода составляет порядка 40 % от номинальной частоты вращения, броски тока превышают номинальные значения в 2-2,5 раза, в случае применения структурного резервирования эти значения не так критичны.

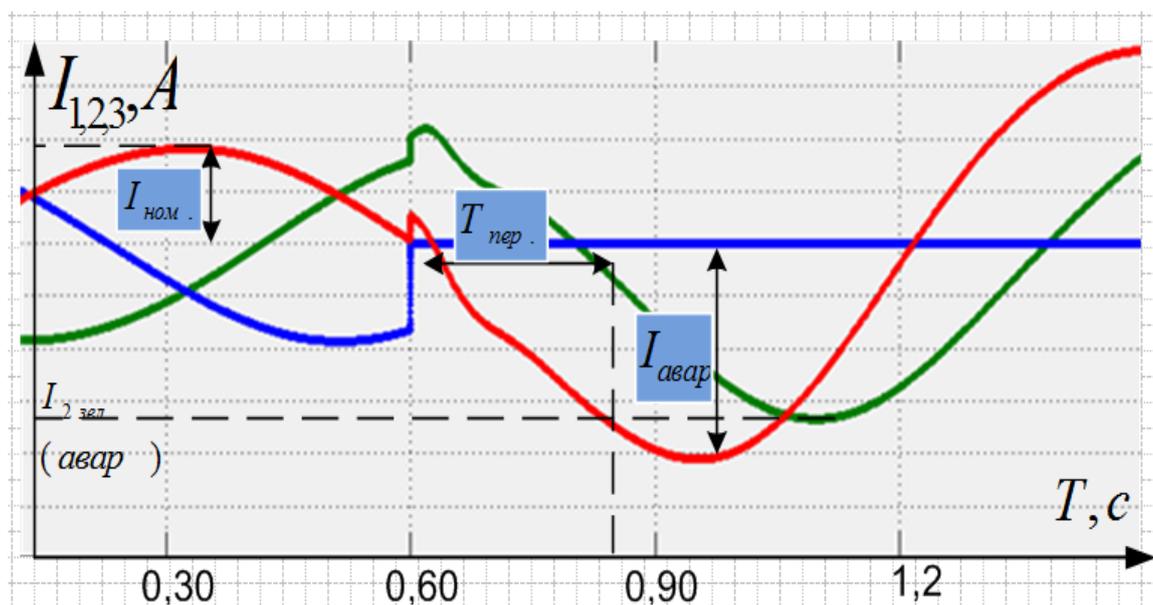


Рисунок 4.2–Время переключение векторов тока во время аварийной ситуации в одной из секции двигателя.

На рисунке 4.2 очевидно что до времени 0.60 с АД работает в номинальном режиме, все три фазы имеют синусоидальный сигнал. После обнаружения неисправности следует обрыв  $I_{син}$ . Алгоритмом восстановления формирует значение токов в аварийном режиме  $I_{авар}$ . Время переключения структуры -  $T_{пер} \approx 20$  м\с

#### 4.4 Аварийный двухфазный режим с использованием алгоритма восстановления работоспособности на основе структурного резервирования

На Рисунке 4.3 приведены диаграммы состояния двухсекционного асинхронного электропривода при различных отказах. Так же проведен сравнительный анализ тока, момента и скорости. Таблица 4.2

Таблица 4.2	АД1			АД2			Динамические параметры	
	Состояние ЭП	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$ \dot{\omega} $
3ф+3ф	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2ф+3ф	↑24%	↑24%	0	↑7%	↑7%	↑7%	↓9%	↓35%
2ф+2ф	↑75%	↑75%	0	↑53%	↑50%	0	↑8%	↓55%
1ф+2ф	0	↑95%	0	↑76%	↑74%	0	↓14	↓23%

Данные приведенные в таблице указаны в процентах, за 100% взято номинальное значение  $I, \omega, M$ .

Рассмотрены неисправности в АД1 и АД2 типа: «невключение» и «невывключение» силового ключа преобразователя частоты. После выявления отказа за счет работы алгоритма происходит увеличение фазных токов в 1,5 раза. Соответственно значение фазных токов, момент и частота вращения в результате алгоритма восстановления будут изменяться. Номинальное значение частоты вращения были измерены в момент времени 0,23.

Из приведенных переходных процессов (рисунок 4.2) видно, что при возникновении аварийной ситуации в обмотке АД2 ток увеличивается на 24%, структура электропривода переключается в аварийный режим с увеличением тока в обмотке АД1 на 7%. Таким образом можно наблюдать кратковременное незначительное снижение момента на 35%. Изменения момента во времени имеют колебательный характер, при этом провал по частоте вращения во время переходного процесса достигает 9 % от заданной частоты вращения. Анализ графиков переходных процессов, показывает, что после переключения структуры электропривода в аварийный режим наблюдается бросок тока, превышающий установившейся ток в 2,5 раза. За счет увеличения тока в обмотках АД1(75%) и АД2(53%) частота вращения увеличилась на 8% относительно номинального значения. При последующей аварии в АД2 ток увеличивается на 90% относительно номинального, скорость и момент

уменьшаются на 14% и 23% соответственно. Электропривод переходит в критический режим работы.

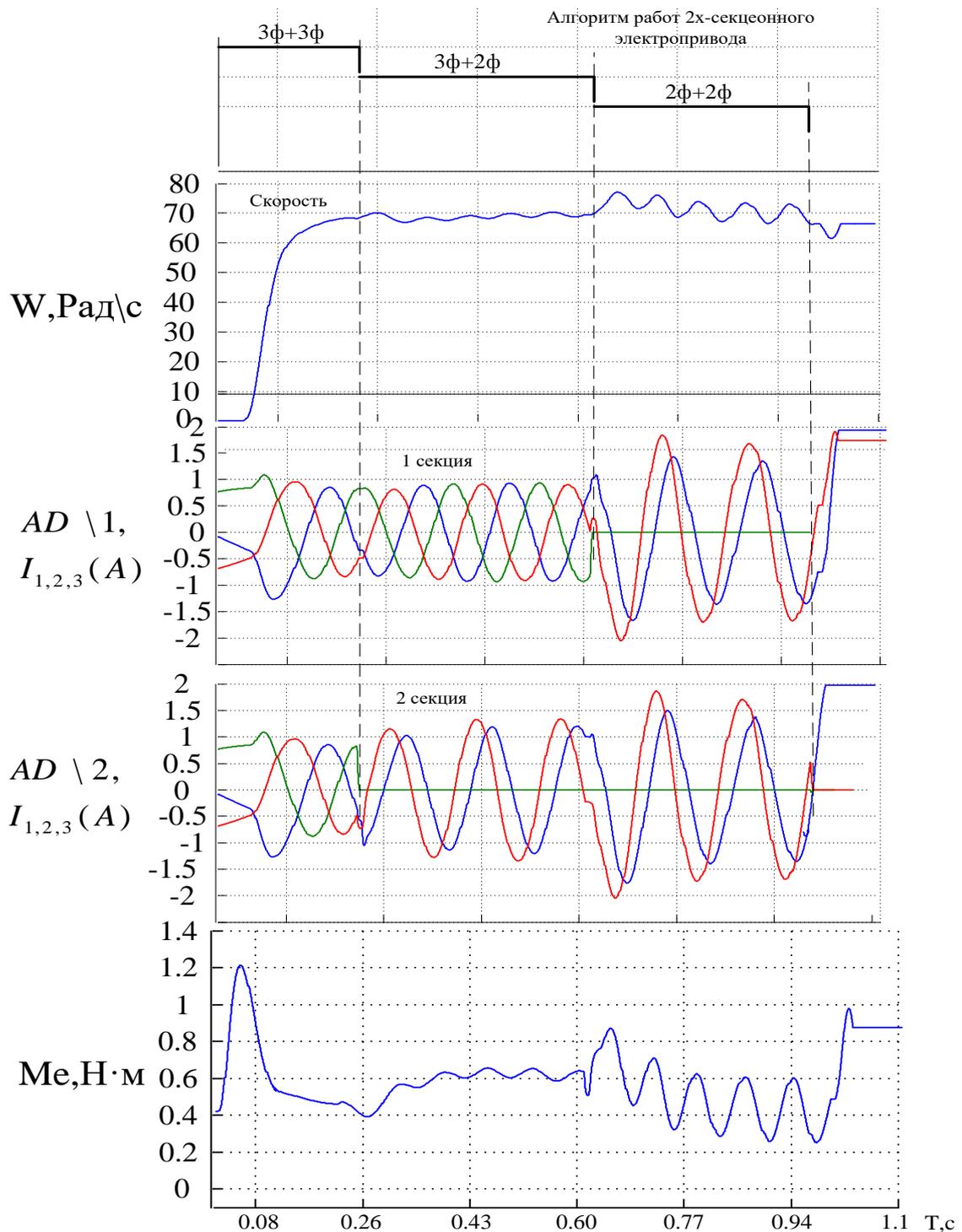


Рисунок 4.3 Двухсекционный электропривод в аварийных режимах с применением функционального резервирования

#### 4.5 Двухсекционный асинхронный электропривод с вентиляторной нагрузкой.

На Рисунке 4.4 приведены диаграммы состояния двухсекционного асинхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой при различных отказах. Так же проведен сравнительный анализ тока, момента и скорости в Таблица 4.3.

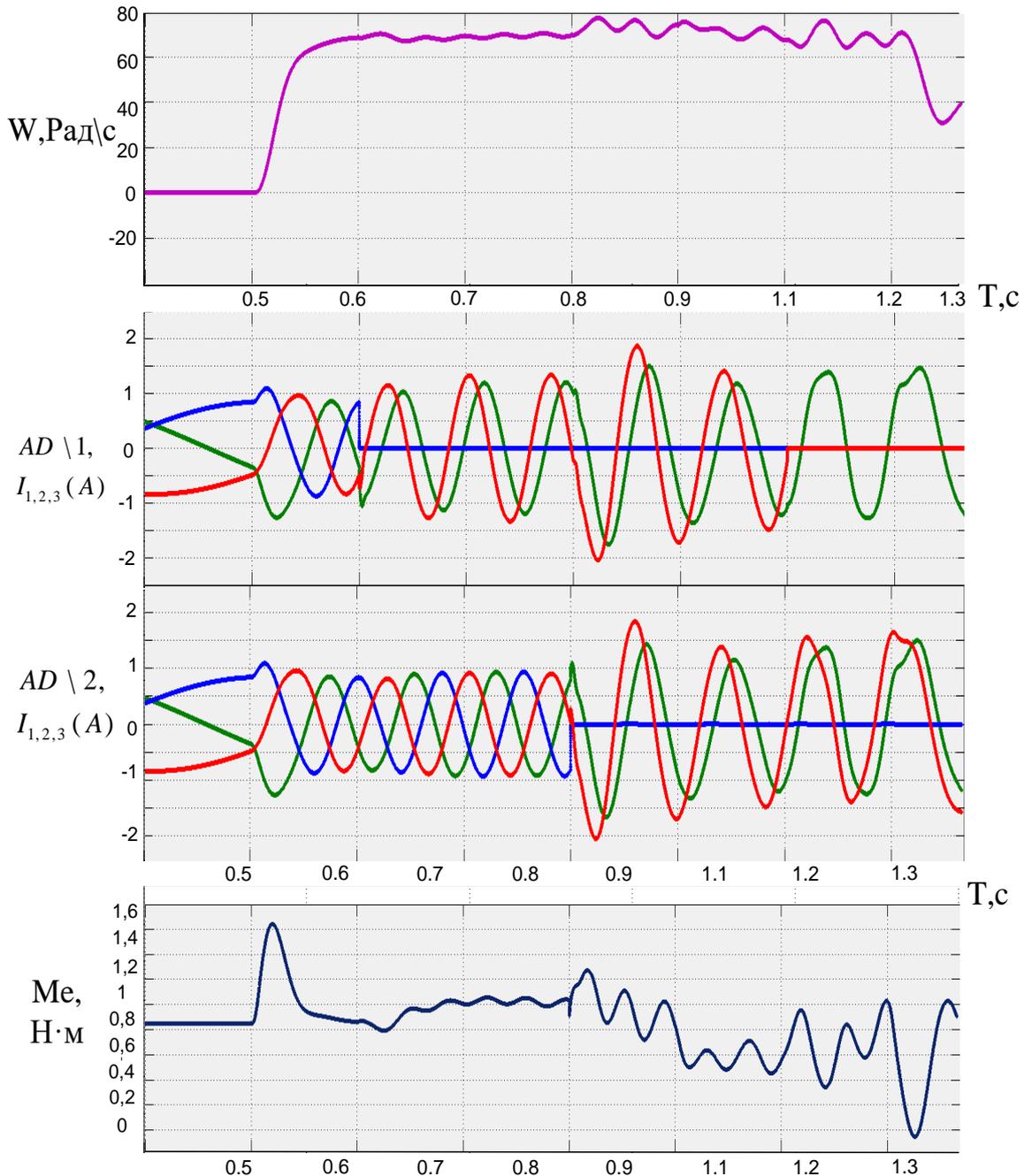


Рисунок 4.4 Двухсекционный асинхронный электропривод с регулируемой вентиляторной нагрузкой.

Таблица 4.3	АД1			АД2			Динамические параметры	
	Состояние ЭП	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$ \dot{\omega} $
3ф+3ф	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2ф+3ф	↑25%	↑23%	0	↑7%	↑7%	↑7%	↑3%	↓62%
2ф+2ф	↑75%	↑73%	0	↑53%	↑50%	0	↑2%	↓85%
1ф+2ф	0	↑95%	0	↑76%	↑74%	0	↓6%	↓71%

Данные приведенные в таблице указаны в процентах, за 100% взято номинальное значение  $I, \omega, M$ .

Рассмотрены неисправности в АД 1 и АД 2 типа: «невключение» и «невывключение» силового ключа преобразователя частоты. После выявления отказа за счет работы алгоритма происходит увеличение фазных токов в 1,5 раза. Соответственно значение фазных токов, момент и частота вращения в результате алгоритма восстановления будут изменяться.

Из приведенных переходных процессов (рисунок 4.4) видно, что при возникновении аварийной ситуации в обмотке АД1 ток увеличивается на 25%, - 23% структура электропривода переключается в аварийный режим увеличивая ток в обмотке АД1 на 7%. В случае с винтеляторной нагрузкой при возникновении аварийной ситуации момент на ее валу можно снизить в 2раза (62%) что позволит электроприводу снизить токовый бросок в обмотках АД. %. Изменения момента во времени имеют колебательный характер, при этом провал по частоте вращения во времени при снижении нагрузки уменьшится на 3 % относительно номинального значения. Анализ графиков переходных процессов, показывает, что после переключения структуры электропривода в аварийный режим наблюдается бросок тока, превышающий установившейся ток в 1.5 раза.

При возникновении дальнейших неисправностей в АД2. Из графиков переходных процессов, видно, что после переключения структуры наблюдается бросок тока, превышающий установившейся ток на 53% и 50% соответственно. За счет увеличения тока в обмотках АД1(75%) и (73%) от номинального значения. Скорость увеличилась на 2% относительно номинального значения.

При последующей аварии в АД1 ток в одной работающей обмотки увеличивается на 95%, а в АД2 на 76%-74 относительно номинального, что позволит электроприводу сохранить живучесть. Скорость и момент уменьшаются на 7% и 71% соответственно, но сохранит свою работоспособность за счет снижения нагрузки на валу. Таким образом, можно сказать, что при снижении нагрузки на электропривод увеличиваться время работы в аварийном режиме.

#### 4.6 Двухсекционный асинхронный электропривод с постоянной нагрузкой

На Рисунке 4.5 приведены диаграммы состояния двухсекционного асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой при различных отказах. Так же проведен сравнительный анализ тока, момента и скорости. Таблица 4.4

Таблица 9 Состояние ЭП	АД1			АД2			Динамические параметры	
	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$I_{1,кра}$	$I_{2,зел}$	$I_{3,син}$	$ \dot{\omega} $	$M$
3ф+3ф	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2ф+3ф	↑20%	↑19%	0	↑7%	↑7%	↑7%	↑6%	↓38%
2ф+2ф	↑83%	↑76%	0	↑66%	↑49%	0	↑7,5%	↓77%
1ф+2ф	0	↑90%	0	↑130%	↑115%	0	↓5,5%	↓64%

Данные приведенные в таблице указаны в процентах, за 100% взято номинальное значение  $I, \omega, M$ .

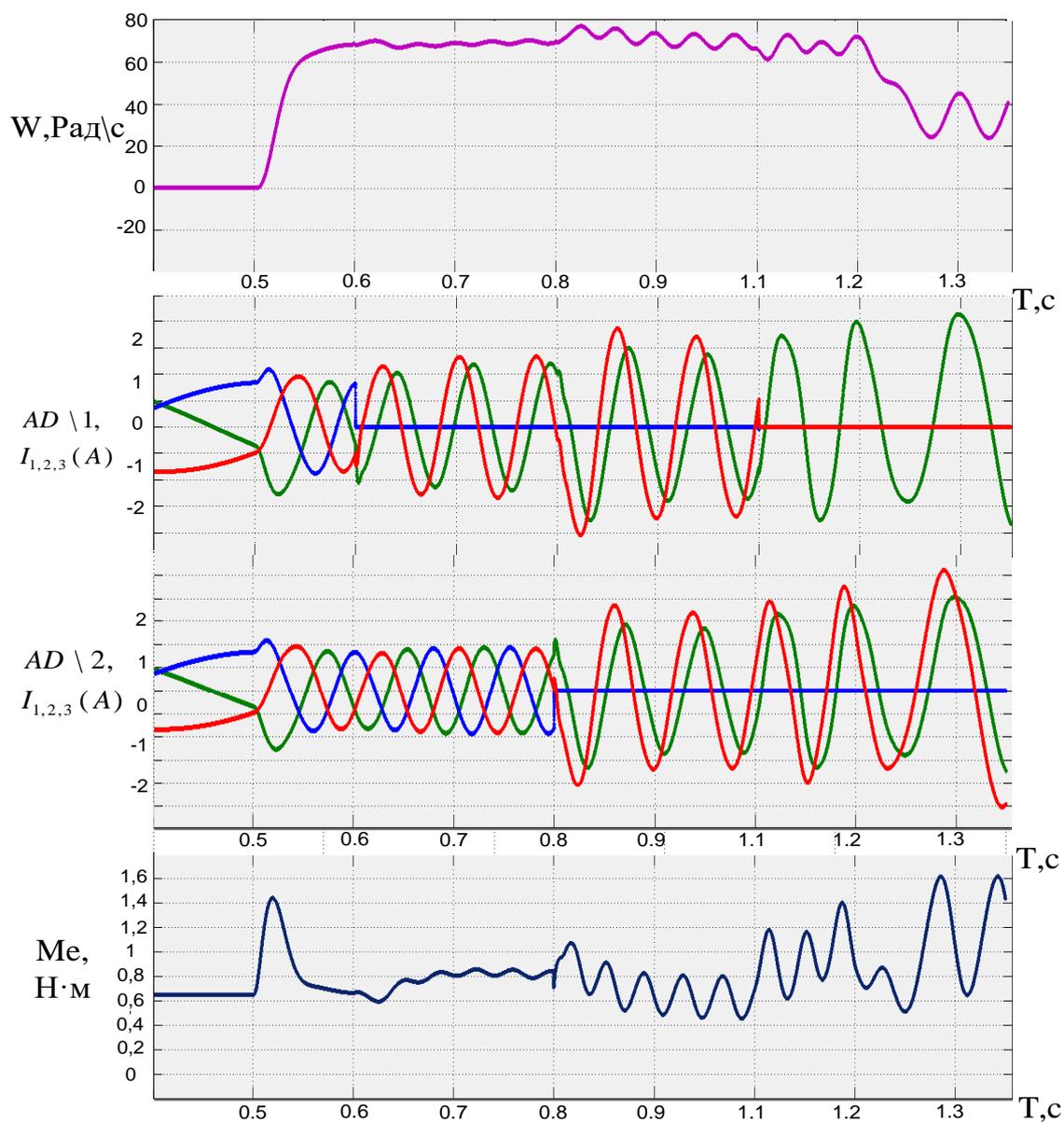


Рисунок 4.5 Двухсекционный асинхронный электропривод с постоянной нагрузкой.

Рассмотрены неисправности в АД 1 и АД 2 типа: «невключение» и «невывключение» силового ключа преобразователя частоты. После выявления отказа за счет работы алгоритма происходит увеличение фазных токов в 1,5 раза. Соответственно значение фазных токов, момент и частота вращения в результате алгоритма восстановления будут изменяться.

Из вышеприведенных диаграмм состояния переходных процессов двухсекционного электропривода с постоянной нагрузкой. (рисунок 4.5) видно, что при возникновении аварийной ситуации в обмотке АД1 ток увеличивается на 20-19%, структура электропривода переключается в аварийный режим увеличивая ток в обмотке АД2 на 7%. Таким образом можно наблюдать незначительное снижение момента 38%. За счет увеличения токов, скорость электропривод растет на 6%. При возникновении дальнейших неисправностей в АД2 типа «невключение» и «невывключение» силового ключа, или неисправности в обмотки АД2. Из графиков переходных процессов, видно, что после переключения структуры наблюдается бросок тока, превышающий установившейся ток в 2.5 раза. За счет увеличения тока в обмотках АД1(76-83%) и АД2(53-49%). Скорость увеличилась на 7.5% относительно номинального значения. При последующей аварии в АД2 ток увеличивается на 90% относительно номинального, скорость и момент уменьшаются на 5% и 63% соответственно. Электропривод переходит в критический режим работы, условия теплового баланса нарушаться. При длительной эксплуатации в аварийном режиме можно наблюдать процессы на рисунке 4.6, что приводит к выгоранию обмоток электропривода, таким образом можно сказать, что структурно резервируя электропривод можно увеличить срок его службы в аварийной ситуации.

Тепловой баланс асинхронного двигателя в аварийном режиме представлен на рисунке 4.6. При задействовании структурного резерва частотно-токовое управление позволяет снизить броски тока, а также обеспечив минимальный провал по скорости 5.5% от установившегося значения. При однократной аварии двухсекционный электропривод может продолжить работу в неполно фазном режиме вплоть до окончания технологического процесса(т.е. ЭП структурно резервирован). В случае неадекватного отказа а именно 2ф+2ф двухсекционный электропривод может выдержать в таком режиме не более 10-15 минут( исходя из результатов моделирования) В случае 1ф+2ф электропривод в критическом режиме функционирует не более 5-7 минут

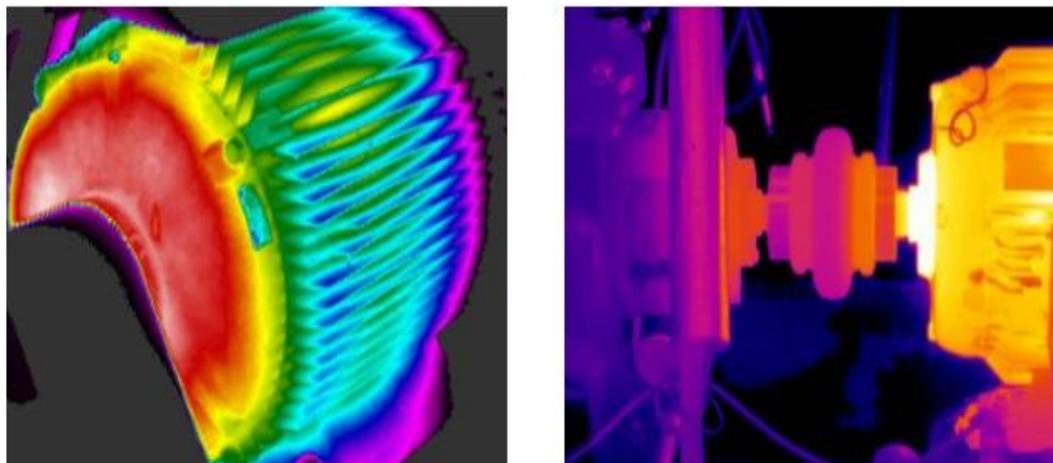


Рисунок 4.6 Тепловой баланс асинхронного двигателя в номинальном и аварийном режиме работы.

#### 4.7. Выводы по разделу

1. Рассмотрены схемные решения отказоустойчивого двухсекционного асинхронного электропривода при различных нагрузках, на основе функционального резерва. Приведены особенности управления АД для систем векторного управления в аварийном двухфазном режиме работы.

2. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления для двухсекционного электропривода в аварийном двухфазном режиме, трехфазного асинхронного АД.

3. На основе разработанной имитационной модели в среде MatlabSimulink показан процесс восстановления работоспособности двухсекционного асинхронного электропривода с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты, при отказе в одной из фаз. на основе формирования несинусоидальных фазных токов и позволяющий полностью восстановить работоспособность двигателя в режиме 0,6 от номинального момента. Таким характером нагрузке обладают вентиляционные установки и насосы.

4. Представлены решения по построению отказоустойчивого двухсекционного асинхронного электропривода на основе структурного и функционального резерва. Наименьшие токи в переходных режимах протекают

в обмотках электропривода в случае с вентиляторной нагрузкой. При многократных отказах электропривода максимальная амплитуда токов не более чем в 2 раза превышает номинальное значение, при этом провал по частоте вращения также носит минимальный характер и не превышает 6%. Максимальные броски тока наблюдаются при случае  $(1\phi+2\phi)$  составляет порядка 95% от номинального значения.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.**

Более 60% вырабатываемой электроэнергии в настоящее время потребляется электрическими двигателями. Среди них наиболее распространенными являются электродвигатели переменного тока, среди которых главную роль занимает асинхронный двигатель, отличающийся своей простотой и надежностью.

Очевидно, что повышение отказоустойчивости неразрывно связано с живучестью электроприводов, обеспечивающих функциональные свойства технологического оборудования в заданных пределах. Обеспечить свойство живучести возможно на основе технологии построения избыточных систем, используя комбинацию следующих видов резервирования: структурного, функционального, временного, информационного и нагрузочного. Построение таких электроприводов невозможно без проведения экспериментальных исследований, разрабатываемых установок.

### **5.1 Планирование работ и их временных оценок.**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входит : научный руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Структура работ приведена в таблице 5.1:

Таблица 5.1 –Перечень работ и оценка времени их выполнения

№	Наименование работы	Количество исполнителей	Продолжительность, дн.
1	Составление и утверждение технического задания	Инженер 10р. НР 16р.	5
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер 10р.	20
3	Выбор направления исследований	Инженер 10р. НР 16р.	2
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер 10р.	3
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер 10р.	11
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер 10р.	9
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер 10р.	7
8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер 10р. НР 16р.	3
9	Составление пояснительной записки	Инженер 10р.	30
10	Публикация полученных результатов	Инженер 10р.	2

Всего 92 дн., в том числе НР 15 дн.

НР участвует в проекте 10%.

Календарное планирование в управлении проектами – это ключевой и важный процесс, результатом которого является утвержденный руководством компании календарный план проекта (часто его называют еще планом-графиком, календарным графиком, планом управления проектом). Цель календарного планирования – получить точное и полное расписание проекта с учетом работ.

Таблица 5.2 –Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Продолжительность выполнения работ															
			декабрь		январь			февраль			март			апрель				
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель и инженер	■															
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель и инженер	■															
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель и инженер		■														
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер			■													
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер			■	■	■	■										
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Научный руководитель и инженер						■	■	■	■							
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер											■					
8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель и инженер												■				
9	Составление пояснительной записки	Инженер														■		
10	Публикация полученных результатов	Инженер																■

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу

## **5.2 Расчет сметы затрат на исследование.**

При планировании бюджета научно-технического исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИИ используется следующая группировка затрат. Представлена общая формула (5.1).

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} \quad (5.1)$$

- ( $K_{mat}$ ) материальные затраты;
- ( $K_{ам}$ ) амортизация;
- ( $K_{з/пл}$ ) затраты на заработную плату;
- ( $K_{с.о}$ ) затраты на социальные нужды;
- ( $K_{пр}$ ) прочие затраты;
- ( $K_{накл}$ ) накладные затраты.

## **5.3 Расчёт материальных затрат.**

Принимаем  $K_{mat}$  в размере 1000руб. на канцелярские товары;

## **5.4 Расчёт затрат амортизации.**

Амортизация ( $K_{ам}$ ) – это процесс переноса стоимости основных средств, на стоимость произведенной и проданной конечной продукции по мере их износа, как материального, так и морального. Расчёт производится по формуле (5.2).

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \quad (5.2)$$

где  $T_{исп.кт}$  – время использования компьютерной техники;

$T_{кал}$  – календарное время (365 дней);

$Ц_{кт}$  – цена компьютерной техники (30000 руб);

$T_{сл}$  – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{ам} = \frac{92}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{5} = 1536 \text{ руб}$$

### 5.5 Расчёт затрат на заработную плату.

Подразумевает вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату ( $Kз/пл$ ) для инженера и НР, расчёт осуществляется по формулам (5.3 – 5.5):

Месячная зарплата :

$$ЗП_{ф} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n$$

$$ЗП_{мес} = ЗП_о \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (4.3)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%);

$K_2$  – районный коэффициент (1,3=30%);

$ЗП_о$  – месячный оклад (инж = 17 000, науч.рук = 30 000руб);

$$ЗП_{мес \text{ инж}} = 17\,000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24\,310 \text{ руб};$$

$$ЗП_{мес \text{ н.р}} = 30\,000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42\,900 \text{ руб}.$$

*Зарплата за фактическое отработанное время:*

$$ЗП_{\Phi} = \frac{ЗП_{\text{мес}}}{21} \cdot n \quad (5.4)$$

где  $21$  – число рабочих дней в месяц;

$n$  – фактическое число дней в исследовании научной работы.

$$ЗП_{\text{инж}} = \frac{24310}{21} * 150 = 173\ 642 \text{ руб.};$$

$$ЗП_{\text{н.р}} = \frac{42900}{21} * 15 = 30\ 642 \text{ руб.}$$

*Заработная плата инженера/ научного руководителя:*

$$Кз / нл = ЗП_{\text{инж}} + ЗП_{\text{нр}} \quad (4.5)$$

$$Кз/нл = 173\ 642 + 30\ 642 = 204\ 284 \text{ руб}$$

### **5.6 Затраты на социальные отчисления.**

Затраты на социальные отчисления (*Кс.о.*) –затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непромышленной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством. Рассчитывается по формуле (5.6)

$$Кс.о = \frac{Кз/нл \cdot 30\%}{100} \quad (5.6)$$

где, затраты на социальные нужды (отчисления) 30% от *Кз/нл*.

$$Кс.о = \frac{204284 \cdot 30}{100} = 61\ 285 \text{ руб}$$

$$\text{Прочие затраты (5.7) } K_{np} = \frac{K_{mat} + K_{am} + K_{z/пл} + K_{c.o}}{100\%} \cdot 10\% \quad (5.7)$$

где  $K_{np}$  принимаются в размере 10% от  $(K_{mat} + K_{am} + K_{z/пл} + K_{c.o})$ .

$$K_{np} = \frac{1000 + 1095 + 204284 + 61285}{100} \cdot 10 = 26\,766 \text{ руб}$$

### 5.7 Накладные расходы.

Затраты на накладные ( $K_{накл}$ ), не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др. Рассчитываются по формуле (5.8)

$$K_{накл} = \frac{K_{зп/пл} \cdot 200\%}{100} \quad (5.8,) \text{ где } K_{накл}, \text{ принимаются в размере 200\% от } K_{з/пл}.$$

$$K_{накл} = \frac{204284 \cdot 200}{100} = 408\,568 \text{ руб,}$$

### 5.8 Определение общего бюджета затрат на научно-исследовательскую работу.

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Процесс формирования бюджета, планируемых затрат представлен в формуле (4.1) и таблице 5.3.

$$K_{np} = 1000 + 1095 + 204284 + 61\,285 + 26\,766 + 408\,568 = 702\,998 \text{ руб.}$$

Таблица 5.3 – Результаты полученных данных.

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1095
3	Затраты на заработную плату	204 284
4	Затраты на социальные нужды	61 285
5	Прочие затраты	26 766
6	Накладные расходы	408 568
	<b>Итого:</b>	<b>702 998</b>

### **5.9 Смета необходимых материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования.**

Любой план действий должен сопровождаться сметой расходов – составлением бюджета, который является количественным воплощением плана, характеризуя доходы и расходы на конкретный период и определяя потребность в ресурсах для достижения заданных планом целей. В таблице – 5.4 приведена смета затрат на выполнение исследовательской работы.

Таблица 5.4 – Смета затрат на оборудование

№	Вид оборудования	Стоимость, руб
1	Компьютер	30000
2	Бумага А4	500
3	ПО MatlabR2014a	107500
<b>Итого</b>		<b>138 000</b>

В результате выполнения работы был разработан макет установки для проведения эксперимента по исследованию отказоустойчивого асинхронного электропривода. Техническое решение позволяет проводить испытания как номинальных, так и аварийных и неполнофазных режимов работы. С помощью

представленного стенда возможно производить проверку имитационных моделей на адекватность, проводить испытания асинхронного двигателя в различных режимах работы. Результаты проверки опубликованы более чем в 5 различных конференциях на территории РФ. Разработанное техническое решение было запатентовано, полученный патент на полезную модель представлен на рисунке 5.1



Автор(ы): *Однокопылов Георгий Иванович (RU), Деметьев Юрий Николаевич (RU), Брагин Александр Дмитриевич (RU), Розаев Иван Андреевич (RU), Иванов Кирилл Владимирович (RU)*

Рисунок 5.1 Патент на полезную модель «Асинхронного электропривода с повышенной живучестью»

## **6 Соцеальная ответственность**

### **Введение**

Представление о понятии «Социальная ответственность» будущий специалист может получить из международного стандарта ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации». В этом стандарте раскрывается понятие «Социальной ответственности», о ее значимости в таких областях профессиональной деятельности, как промышленная безопасность, гигиена труда, охрана окружающей среды и ресурсосбережение.

С развитием новейшей полупроводниковой техники появилась тенденция к исследованию новых перспективных электроприводов для их внедрения в опасные производственные механизмы. Основной целью работы является разработка и исследование отказоустойчивого асинхронного электропривода. Требуется провести ряд исследований по тематике с целью выявления возможности применения данного типа электропривода в военной, химической и прочих важных областях промышленности. Под этим понимается изучение теоретических аспектов дисциплин электрические машины и электропривод, разработка математических моделей, описывающих электромеханические процессы, протекающие в электроприводе, обработка и анализ результатов моделирования. Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что основная работа выполняется непосредственно за компьютером, которой сопутствует соответствующий список вредных и опасных производственных факторов.

### **6.1 Вредные производственные факторы**

При выполнении работ на персональном компьютере (ПК) согласно ГОСТу 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» могут иметь место следующие факторы:

- отсутствие или недостаток естественного света;
- недостаточная искусственная освещенность рабочей зоны;
- зрительное напряжение;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенная напряженность электрического поля;

## **Освещенность**

Рабочее освещение следует предусматривать для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта. Для помещений, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения и различными режимами работы, необходимо раздельное управление освещением таких зон. Существует три вида освещения - естественное, искусственное и совмещенное (естественное и искусственное вместе) [31].

Естественное освещение - освещение помещений дневным светом, проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях помещений. Естественное освещение характеризуется тем, что меняется в широких пределах в зависимости от времени дня, времени года, характера области и ряда других факторов.

Искусственное освещение применяется при работе в темное время суток и днем, когда не удастся обеспечить нормированные значения коэффициента естественного освещения (пасмурная погода, короткий световой день). Освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным, называется совмещенным освещением.

Искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное, эвакуационное, охранное. Рабочее освещение, в свою очередь, может быть общим или комбинированным. Общее - освещение, при котором светильники размещаются в верхней зоне помещения равномерно или применительно к расположению оборудования. Комбинированное - освещение, при котором к общему добавля-

ется местное освещение. Согласно [32] помещений вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люми-несцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно [32].

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 750лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно. Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости. Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с Сан-ПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. В таблице 6.1. приведены характеристики исследуемого помещения.

Таблица .6.1 – Характеристики помещения

Размеры помещения, м	15x5x3
Кол. х Площадь окна, м <sup>2</sup>	2 х 2,8
По количеству пыли	Малое
Характеристика помещения по пожароопасности	Непожароопасное

Произведем расчет освещенности помещения. Выбираем светильники типа ОДОР т.к. они для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости,  $\lambda = 1,1$ . Рабочая поза научного работника при работе за компьютером – сидя.

- a) Высота рабочей поверхности  $h_p = 1,1$  м
- b) Отделка стен: оклеенные светлыми обоями
- c) Отделка потолка: светлый деревянный (окрашенный)

Коэффициент отражения стен  $R_c = 30\%$ , потолка  $R_n = 50\%$ . Коэффициент запаса  $k = 1,5$ ; коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ . Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Приняв  $h_c = 0,3$  м, получаем:

$$h = H - h_c - h_p = 3 - 0,6 - 1,1 = 1,3 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 1,3 = 1,43 \text{ м};$$

$$L/3 = 0,48 \text{ м}.$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 8 светильников типа ОДОР мощностью 30 Вт (с длиной 1,227 м, шириной 0,265 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 40 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рисунок 5.1). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $n = 32$ . Разряд зрительных работ – средней точности, согласно СНиП -  $E_n = 300$ . Находим индекс помещения:

$$i = S / (h(A+B)) = 75 / (1,3(15 + 5)) = 2,88$$

По таблице 16 [32] определяем коэффициент использования светового потока:  $\eta = 0,62$ . Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot k_z \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 75 \cdot 1,5 \cdot 1}{32 \cdot 0,62} = 1701 \text{ Лм}$$

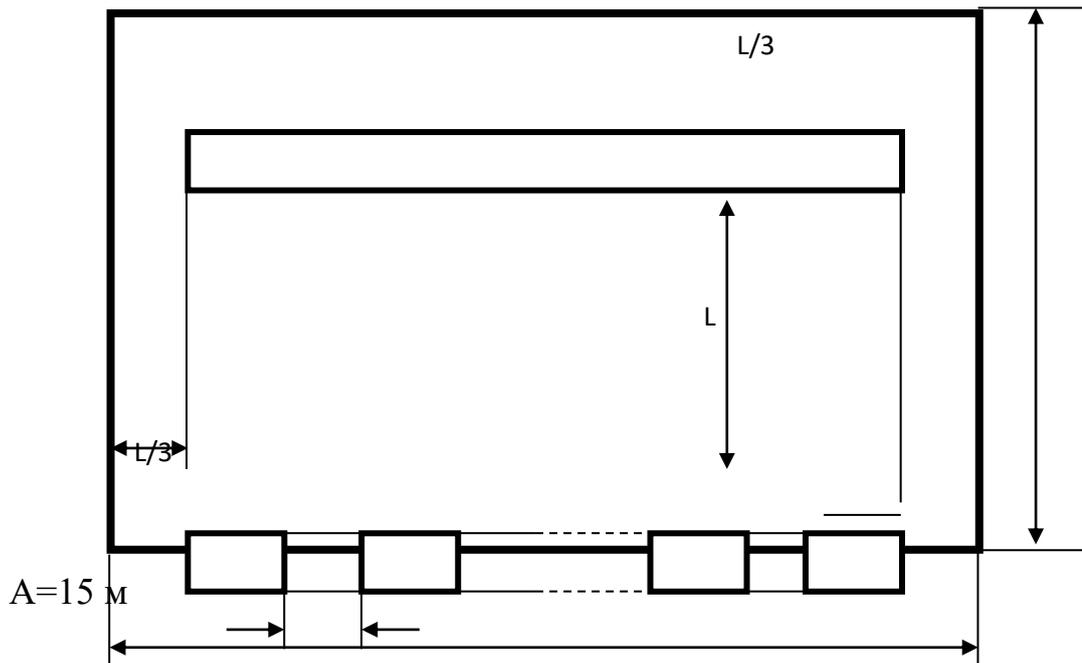


Рисунок 6.1. План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

По таблице выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛД 30 Вт с потоком 1800 Лм. Делаем проверку:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Производя проверку выполнения условия получаем  $-10\% \leq 0,06\% \leq +20\%$  - условие выполняется.

## 6.2 Микроклимат

Микроклиматические условия (физические условия) - давление (не нормируется), температура, относительная влажность, скорость движения воздуха -

вливают на самочувствие человека и вызывают определённые пограничные состояния. Человек реагирует на эти состояния через:

1.Механизм терморегуляции, то есть регулирование теплообмена с окружающей средой.

2.Сохранение температуры тела на постоянном нормальном уровне 36,6 °С, независимо от внешних условий и тяжести выполняемой работы. Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару.

В ГОСТ [30] указаны оптимальные и допустимые показатели микроклимата в производственных помещениях. Оптимальные показатели распространяются на всю рабочую зону, а допустимые устанавливаются отдельно для постоянных и непостоянных рабочих мест в тех случаях, когда по технологическим, техническим или экономическим причинам невозможно обеспечить оптимальные нормы. Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, инсоляции на постоянных и непостоянных рабочих местах не должна превышать  $35 \text{ Вт/м}^2$  при облучении 50% поверхности тела и более,  $70 \text{ Вт/м}^2$  - при величине облучаемой поверхности от 25 до 50% и  $100 \text{ Вт/м}^2$  - при облучении не более 25% поверхности тела. Интенсивность теплового облучения работающих от открытых источников (нагретый металл, стекло, "открытое" пламя и др.) не должна превышать  $140 \text{ Вт/м}^2$ , при этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

Методы защиты: системы местного кондиционирования воздуха, воздушное душирование, помещения для отдыха и обогрева, спецодежда и другие средства индивидуальной защиты, регламентация времени работы и отдыха и т. п [33, 30].

### 6.3 Электромагнитное излучения

Каждое устройство, которое производит или потребляет электроэнергию, создает электромагнитное излучение. Это излучение концентрируется вокруг устройства в виде электромагнитного поля. Гигиенические требования к показателям электромагнитного поля и ионизирующего излучения персонального компьютера приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Гигиенические требования к показателям электромагнитного поля и ионизирующего излучения персонального компьютера

Нормируемый параметр	ПДУ
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения на расстоянии 5 см от монитора	100 мкР/час
Напряженность электрического поля на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц – 2 кГц 2 – 400 кГц	25 В/м 2,5 В/м
Плотность потока магнитной индукции на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц – 2 кГц 2 – 400 кГц	250 нТл 25 нТл
Эквивалентный поверхностный электростатический потенциал	500 В

Основную опасность для здоровья пользователя (и находящихся вблизи от ПК лиц) представляет электромагнитное излучение в диапазоне 20 – 400 кГц, создаваемое отклоняющей системой кинескопа и видеомонитора. Многочисленные экспериментальные данные, свидетельствующие о влиянии ЭМП на живой организм (на молекулярном и клеточном уровне) – нервную, эндокринную, иммунную и кроветворную системы организма.

Самой опасной является низкочастотная составляющая ЭМП (до 100 Гц), способствующая изменению биохимической реакции крови на клеточном уровне. Это приводит к возникновению у человека симптомов раздражительности, нервного напряжения и стресса, вызывает осложнения в течение беременности и увеличение в несколько раз вероятности выкидышей, способствует нарушению репродуктивной функции и возникновению рака.

Видеомонитор создает вокруг себя ЭМП как низкой, так и высокой частоты, что способствует появлению электростатического поля и ведет к деионизации воздуха вокруг, а это влияет на развитие клеток тканей организма, увеличивает вероятность возникновения катаракты.

В целях предосторожности следует обязательно использовать защитные экраны, а также рекомендуется ограничивать продолжительность работы с экраном ВДТ, не размещать их концентрированно в рабочей зоне и выключать их, если на них не работают.

Наряду с этим нужно устанавливать в помещении с ВДТ ионизаторы воздуха, чаще проветривать помещение и хотя бы один раз в течение рабочей смены очищать экран от пыли.

Все ПЭВМ должны иметь техническую документацию и гигиенический сертификат. С 1 января 1997 г в России введен новый норматив безопасности видеомониторов, соответствующий требованиям самого строгого в мире шведского стандарта MPR . Однако, как показали исследования центров Госсанэпиднадзора РФ, значительная часть эксплуатируемых мониторов ПК не соответствует гигиеническим требованиям по энергетическим характеристикам ЭМП, их излучения распространяются по всем направлениям в радиусе 2,5 м.

Следует отметить, что большую роль в снижении низкочастотной электрической составляющей ЭМП видеомонитора играет эффективность заземления (зануления) компьютера и его периферийных устройств, включая локальную сеть.

## 6.4 Опасные факторы

Среди опасных производственных факторов, сопутствующих трудовой деятельности научного работника, можно выделить следующие:

- Поражение электрическим током;
- Пожароопасность.
- Чрезвычайные ситуации (Эвакуация)

## 6.5 Поражение электрическим током

Работа с электрическим током требует особой осторожности: электрический ток поражает внезапно, когда человек оказывается включенным в цепь прохождения тока.

Причины поражения электрическим током:

- a) прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, ламповых патронов, предохранителей, находящихся под напряжением;
- b) прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением;
- c) нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;
- d) нахождение в непосредственной близости от токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В;
- e) прикосновение к токоведущей части и мокрой стене или металлической конструкции, соединенной с землей;
- f) одновременное прикосновение к двум проводам или другим токоведущим частям, которые находятся под напряжением;
- g) несогласованные и ошибочные действия персонала (подача напряжения на установку, где работают люди; оставление установки под напряжением без

надзора; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.).

Опасность поражения электрическим током отличается от других производственных опасностей тем, что человек не в состоянии без специальных приборов обнаружить ее на расстоянии. Часто эта опасность обнаруживается слишком поздно, когда человек уже оказался под напряжением. Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний характер. Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов; электролитическое — в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает нарушение ее состава, а также ткани в целом; механическое - в расслоении, разрыве тканей организма: биологическое - в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов. Например, взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать непроизвольные сокращения мышц. Существуют три основных вида поражения электрическим током: электрические травмы, электрические удары, электрический шок.

Электрическая травма - местное поражение тканей и органов электрическим током: ожоги, электрические знаки, электрометаллизация кожи, поражение глаз воздействием на них электрической дуги (электроофтальмия), механические повреждения.

Электрический ожог — это повреждения поверхности тела или внутренних органов под действием электрической дуги или больших токов, проходящих через тело человека.

Электрический удар - это возбуждение живых тканей организма проходящим через них электрическим током, сопровождающееся непроизвольными судорожными сокращениями мышц.

Электрический шок - своеобразная реакция нервной системы организма в ответ на сильное раздражение электрическим током: расстройство кровообращения, дыхания, повышение кровяного давления. Шок имеет две фазы: I — фаза возбуждения. II — фаза торможения и истощения нервной системы.

Все существующие мероприятия, обеспечивающие безопасность использования электроэнергии, можно условно разделить на три группы.

Организационные мероприятия включают в себя:

- a. правильный подбор персонала, обслуживающего электроустановки (запрещение использования труда лиц моложе 18 лет, а также не обученных и не прошедших медицинское освидетельствование для работы данного вида);
- b. обучение правилам безопасности при обслуживании электроустановок, т. е. проведение специального обучения для выполнения работ с повышенной опасностью, аттестации, инструктажей по безопасности труда, разработка и издание инструкций по охране труда, применение средств пропаганды правил электробезопасности (плакатов, видеофильмов и пр.);
- c. назначение ответственных за электрохозяйство лиц;
- d. контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ;
- e. проведение периодических осмотров, измерений и испытаний электрооборудования (в сухих помещениях — 1 раз в два года, в сырых — ежегодно, при этом сопротивление рабочей изоляции проводов, кабелей и электрооборудования в процессе эксплуатации не должно быть менее 0,5 и 2 М Ом для двойной или усиленной изоляции), а в случае несоответствия предъявляемым требованиям — его ремонта;
- f. контроль за надежностью СИЗ от поражения электрическим током.
- g. Дополнительные защитные средства не могут самостоятельно защитить человека от поражения электрическим током, но при совместном использовании они усиливают изолирующее действие основных защитных

средств. К дополнительным средствам защиты при работе в электроустановках до 1000 В относят диэлектрические галоши, коврики, подставки и площадки; в электроустановках свыше 1000 В — диэлектрические перчатки, боты и коврики, а также диэлектрические основания.

Необходимо отметить, что при отсутствии какого-либо дополнительного средства защиты (например, диэлектрического коврика) нельзя применять ни одно из основных. Вспомогательные приспособления предназначены для защиты людей от сопутствующих опасных и вредных производственных факторов при работе с электрооборудованием и, кроме того, от падения с высоты. К ним относят экранирующие комплекты и устройства для защиты от воздействия электрического поля, противогазы, защитные каски, страховочные канаты, монтерские когти, предохранительные монтерские пояса и т. п.

## **6.6 Пожароопасность**

Пожарная безопасность регламентируется ГОСТ 12.1.004-91, ГОСТ 12.1.010-76; ОСТ 29.12.0.004-82, строительными нормами и правилами (СНИП); типовыми правилами пожарной безопасности для промышленных предприятий; правилами пожарной безопасности при эксплуатации зданий и сооружений (ППБ-0-22-83) и инструкциями по пожарной безопасности на отдельных объектах полиграфического производства.

Опасными факторами, воздействующими на людей при пожаре, являются: открытый огонь; повышенная температура воздуха и окружающих предметов; дым; токсические продукты горения; взрыв; обрушение строительных конструкций.

Безопасность людей должна быть обеспечена при возникновении пожара в любом месте объекта.

Все мероприятия пожарной безопасности можно разделить на организационные, технические, режимные и эксплуатационные.

Организационные мероприятия пожарной безопасности предусматривают

правильную организацию пожарной охраны на объекте, проведение противопожарных инструктажей и технических минимумов, пропаганды и агитации, организации добровольных пожарных дружин и т.п.

Технические мероприятия включают строгое соблюдение правил, норм и ГОСТов при проектировании зданий и сооружений, при устройстве электросетей, электроустановок, оборудования, отопления, вентиляции, освещения и др.

К мероприятиям режимного характера относятся меры по запрещению курения и применения открытого огня в недозволённых местах, меры пожарной безопасности при проведении огневых работ и т.п.

Эксплуатационными мероприятиями являются своевременные профилактические осмотры, испытания и ремонты технологического, вспомогательного и инженерного оборудования (электросетей, электроустановок, отопления, вентиляции и т.п.).

Согласно ГОСТу 12.1.004-91 пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты.

Система предотвращения пожара включает следующее:

- a) предотвращение образования горючей среды (обеспечивается соблюдением допустимой концентрации горючих паров, газов и пыли в воздухе);
- b) предотвращение образования в горючей среде источников зажигания (достигается правильной эксплуатацией машин, механизмов и другого оборудования, которые могут явиться источниками зажигания, а также применением электрооборудования и светильников, соответствующих классу взрывопожароопасности помещения; ликвидацией условий для теплового, микробиологического или химического самовозгорания веществ и материалов; применением мер борьбы с разрядами статического электричества и другими видами искрообразования);
- c) поддержание температуры горючей среды ниже максимально допустимой по горючести;
- d) поддержание давления в горючей среде ниже максимально допустимого по

горючести.

і. Система пожарной защиты обеспечивается:

- е) применением негорючих и трудногорючих веществ и материалов вместо пожароопасных, например, замена горючих смывочных веществ (бензин, керосин, толуол, ацетон, спирт и др.) негорючими моющими растворами и др.;
- ф) ограничением скопления материалов и полуфабрикатов на рабочих местах;
- g) изоляцией горючей среды (герметизация оборудования и тары с пожароопасными веществами, механизация и автоматизация производственных процессов, размещение пожароопасных процессов и оборудования в изолированных помещениях, отсеках, камерах);
- h) предотвращением распространения пожара за пределы его очага (устройство противопожарных преград; аварийное отключение оборудования и коммуникаций, использование средств, предотвращающих разлив и растекание жидкостей при пожаре и т.д.).

Для предупреждения возникновения опасных ситуаций, которые могут возникать при нарушении хода технологического процесса, повышении температуры, давления, отказе вентиляции и т.д., следует предусмотреть:

- a. использование контрольно-измерительных приборов и автоматов для контроля, защиты и регулирования технологических процессов и оборудования;
- b. применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре.

Для предупреждения распространения пожара с одного здания на другое между ними устраивают противопожарные разрывы. При определении противопожарных разрывов исходят из того, что наибольшую опасность в отношении возможного воспламенения соседних зданий и сооружений представляет тепловое излучение от очага пожара. Количеством принимаемой теплоты со-

седним с горящим объектом зданием зависит от свойств горючих материалов и температуры пламени, величины излучающей поверхности, площади световых проемов, группы возгораемости ограждающих конструкций, наличия противопожарных преград, взаимного расположения зданий, метеорологических условий и т.д. К ним относят стены, перегородки, перекрытия, двери, ворота, люки, тамбур-шлюзы и окна. Противопожарные стены должны быть выполнены из негорючих материалов, иметь предел огнестойкости не менее 2.5 часов и опираться на фундаменты. Противопожарные стены рассчитывают на устойчивость с учетом возможности одностороннего обрушения перекрытий и других конструкций при пожаре.

Противопожарные двери, окна и ворота в противопожарных стенах должны иметь предел огнестойкости не менее 1.2 часа, а противопожарные перекрытия не менее 1 часа. Такие перекрытия не должны иметь проемов и отверстий, через которые могут проникать продукты горения при пожаре.

При проектировании зданий необходимо предусмотреть безопасную эвакуацию людей на случай возникновения пожара. При возникновении пожара люди должны покинуть здание в течение минимального времени, которое определяется кратчайшим расстоянием от места их нахождения до выхода наружу.

Число эвакуационных выходов из зданий, помещений и с каждого этажа зданий определяется расчетом, но должно составлять не менее двух. Эвакуационные выходы должны располагаться рассредоточено. При этом лифты и другие механические средства транспортирования людей при расчетах не учитывают. Ширина участков путей эвакуации должна быть не менее 1 м, а дверей на путях эвакуации не менее 0.8м. Ширина наружных дверей лестничных клеток должна быть не менее ширины марша лестницы, высота прохода на путях эвакуации - не менее 2 м. При проектировании зданий и сооружений для эвакуации людей должны предусматриваться следующие виды лестничных клеток и лестниц: незадымляемые лестничные клетки (сообщающиеся с наружной воздушной зоной или оборудованные техническими устройствами для подпора

воздуха); закрытые клетки с естественным освещением через окна в наружных стенах; закрытые лестничные клетки без естественного освещения; внутренние открытые лестницы (без ограждающих внутренних стен); наружные открытые лестницы. Для зданий с перепадами высот следует предусматривать пожарные лестницы. [34, 35]

## **6.7 Правила поведения населения при эвакуации в случае ЧС**

Разработчику всегда следует быть готовым к чрезвычайным ситуациям и следует знать, как следует вести себя при эвакуации в случае ЧС. Эвакуация является одним из способов защиты населения в период стихийных бедствий, крупных промышленных аварий и катастроф. Эвакуация заключается в организованном выводе (вывозе) населения из крупных городов, других населенных пунктов и размещение его в безопасных районах, а также выводе (вывозе) населения из зон возможного катастрофического затопления, землетрясения, районов, которым угрожают селевые потоки, снежные заносы, крупные пожары и другие стихийные бедствия. О начале эвакуации населению объявляет местная администрация органов самоуправления. Получив извещение о начале эвакуации, каждый гражданин обязан: собрать все необходимые документы и вещи, паспорт, военный билет, документы об образовании и специальности, трудовую книжку, свидетельства о браке и рождении детей, страховые полисы, деньги, имеющиеся средства индивидуальной защиты, одежду и обувь приспособленные для защиты кожи, аптечку индивидуальную и другие лекарства, индивидуальный противохимический пакет, пакет перевязочный медицинский или другие перевязочные материалы, йод, комплект верхней одежды и обуви по сезону (в летнее время необходимо взять и теплые вещи), постельное белье и туалетные принадлежности, трехдневный запас продуктов.

План эвакуации при пожаре из корпуса НИ ТПУ изображен на рисунке 6.2, где стрелочками нанесены пути, по которым следует производить эвакуацию.

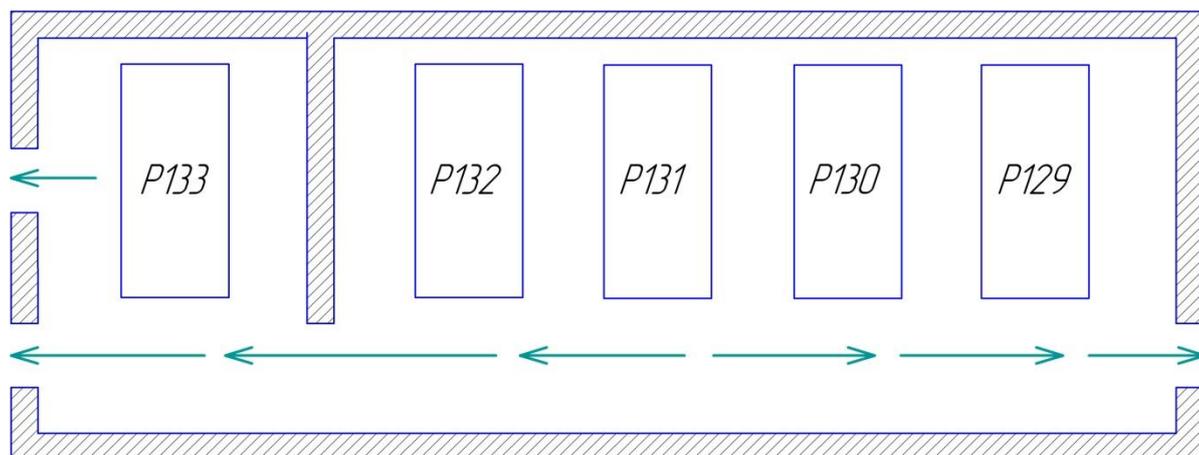


Рисунок 6.2. План эвакуации при пожаре корпуса НИ ТПУ, в котором находится персональный компьютер

Продукты и вещи сложить в чемоданы, рюкзаки, сумки или завернуть в свертки для удобства, переноски и транспортировки, к каждому переносимому предмету прикрепить бирку с указанием фамилии и инициалов, адреса проживания и конечного пункта эвакуации.

Уходя из квартиры, необходимо выключить все осветительные и нагревательные приборы, закрыть краны водопроводной и газовой сети, окна и форточки. К установленному сроку прибыть на эвакуационный пункт для регистрации и отправки в загородную зону или безопасный район.

В пути следования необходимо соблюдать установленный порядок, неукоснительно выполнять распоряжения старшего команды, быстро и грамотно действовать по сигналам оповещения. Эвакуируемые не имеют права самостоятельно, без разрешения местных эвакуационных органов, выбирать пункты и место жительства и перемещаться из одного района в другой. Они обязаны точно выполнять все указания местных органов власти. Все эвакуируемые должны оказывать друг другу помощь.

## **6.8 Выводы по главе**

Организация рабочего места играет большую роль на трудовую деятельность работника. Правильные условия труда обеспечивают не только безопасность работника, но и повышают его производительность и эффективность. В разделе представлены вредные факторы, влияющие на научного сотрудника в ходе его работы, основные меры их профилактики и ликвидации.

## Список публикации:

*Патент на полезную модель « Асинхронный электропривод с повышенной живучестью №164540» от 17 августа 2016, срок действия 02 февраля 2025.*

*Дипломы на российских конференциях:*

- I. Всероссийская научно практическая конференция с международным участием "Повышение эффективности производства и использовании энергии в условиях Сибири"
- II. 1 Всероссийская молодёжной научно-практическая конференция "Введение в энергетику"
- III. 2 Российская молодежной научная конференция "Энергетика Электромеханика и энерго эффективные технологии глазами молодежи "
- IV. Сенькив Е. П. , Иванов К. В. Особенности гибридного автотранспортного средства при отказоустойчивом асинхронном электроприводе [Электронный ресурс] // Введение в энергетику: сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции , Кемерово, 23-25 Ноября 2016. - Кемерово: КузГТУ , 2016 - С. 1-5. - Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articles/3/Senkiv.pdf>
- V. Вислов И. С. , Иванов К. -. , Кладиев С. Н. , Юдинцев А. Г. Питатель-дозатор для неоднородных сыпучих материалов [Электронный ресурс] // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов II Всероссийской научно - практической конференции, Кемерово, 2-4 Декабря 2015. - Кемерово: КузГТУ , 2015 - С. 1-6. Режимдоступа: [http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Kladiev\\_Ivanov.pdf](http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Kladiev_Ivanov.pdf)

- VI. Иванов К. -. Асинхронный электропривод с повышенной живучестью // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы Второй российской молодежной научной школы-конференции, Томск, 29-31 Октября 2014. - Томск: Скан, 2014 - С. 39-42
- VII. Иванов К. -. , Усачёв И. В. Обеспечение повышенной живучести N-секционного асинхронного электропривода [Электронный ресурс] // Введение в энергетику: сборник материалов I Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 17-19 Декабря 2014. - Кемерово: КузГТУ, 2014 - С. 1-4. - Режим доступа: [http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2014/energ1/energ1/pages/Articles/4/Ivanov\\_Usachev.pdf](http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2014/energ1/energ1/pages/Articles/4/Ivanov_Usachev.pdf)
- VIII. Иванов К. В. Модель асинхронного электропривода с повышенной живучестью // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 21-25 Апреля 2015. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015 - Т. 1 - С. 116-125

*Доклад на международной конференции:*

- I. Иванов К. В. Функциональная схема главных электроприводов экскаватора шагового 20/90 // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: РауШ мбх, 2014 - Т. 2 - С. 70-73ч

## Список литературы

1. Принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода на основе резервных элементов
2. Г.и. Однокопылов, в.г. Букреев, а.д. Брагин
3. Восстановление работоспособности трехфазных электроприводов переменного тока при аварии в одной из фаз Однокопылов Г.И., Букреев В.Г.
4. Принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода на основе резервных элементов [электронный ресурс] / Г. И. Однокопылов, В. Г. Букреев, А. Д. Брагин // известия томского политехнического университета [известия тпу] томский политехнический университет (тпу) . — 2013 . — т. 322, № 4 : энергетика . — [с. 133-137] . — заглавие с титульного листа. Электронная версия печатной публикации
5. 4 Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. -Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие. – Томск: изд-во тпу, 20011. – 476 с
6. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - 3е изд., перераб: высшая школа, 2001. - 327 с.
8. Stator fault diagnosis in induction machines by parameter estimation S. Bachir\*\*, s. Tnani\*, t. Poinot\*, j. C. Trigeassou\* \* laboratoired'automatique et d'informatiqueindustrielle, ecolesupérieured'ingénieurs de poitiers 40, avenue du recteurpineau, 86020 poitierscedex, france.
9. Stator fault diagnosis in induction machines by parameter estimation S. Bachir\*\*, s. Tnani\*, t. Poinot\*, j. C. Trigeassou\* \* laboratoired'automatique et d'informatiqueindustrielle, ecolesupérieured'ingénieurs de poitiers 40, avenue du recteurpineau, 86020 poitierscedex, france.

- 10.Петров Г.Н. Электрические машины, ч.2, асинхронные и синхронные машины, м.-л., госэнергоиздат, 1963, 416 с.
- 11.Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – м.: высшая школа; логос; 2000. – 607 стр.
- 12.Электрические машины: в 2-х ч. Ч. 1: учеб. Для электротехн. Спец. Вузов. – 2-е изд. Перераб. И доп. /д.э. Брускин, а.е. Зорохович, в.с. Хвостов. – м.: высш. Шк., 1987.- 319 с.: ил
- 13.Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
- 14.Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК.- СПб.: КОРОНА принт,2003. – 256 стр., ил.
- 15.Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
- 16.Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. //Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.
- 17.Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 20011. – 476 с.
- 18.Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
- 19.Воронин, П.А. Системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода: методические указания по курсу «Системы управления электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. – 51 с.

20. Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами. Часть I. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: учеб. пособие / В.В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 215 с.
21. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
22. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
23. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Высшая школа, 1988. – 479 с.
24. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 213 с.
25. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
26. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб.заведений / Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
27. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция (Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии). – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с
28. Гост 12.2.007.9-93. «безопасность электротермического оборудования.
29. Общие требования»; Ус А.Г., Елкин В.Д. Практическое пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования для студентов дневной и заочной форм обучения специальностей 1-43 01 03 "Электроснабжение", 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций". - Гомель, 2004
30. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
31. СНБ 2.04.05-98 Естественное и искусственное освещение. - Москва: Министерство архитектуры и строительства, 1998. - 59 с.

- 32.Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. Л., "Энергия", 1976.
- 33.Безопасность жизнедеятельности. /Под ред. Н.А. Белова - М.: Знание, 2000 - 364с. [http://www.rabotka.ru/job\\_description/217.php](http://www.rabotka.ru/job_description/217.php) Должностная инструкция научного сотрудника
- 34.Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03), введенные в действие приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313.
- 35.ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ "Пожарная безопасность. Общие требования  
"Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений
- 36.Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений  
"Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
- 37.Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
- 38.Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
- 39.Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с
- 40.Однокопылов Г. И. , Брагин А. Д. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 133-137
41. Однокопылов Г. И. , Брагин А. Д. Математическая модель асинхронного двигателя в аварийном режиме работы // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2013 - №. 2. - С. 330-333
42. Однокопылов Г. И. , Брагин А. Д. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы с эллиптическим полем // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2013 - №. 2. - С. 320-323

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Fail-safe two-section asynchronous electric drive in emergency modes

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Иванов Кирилл Владимирович		

Консультант кафедры ЭПЭО:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Георгий Иванович	Кандидат технических наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Баластов Алексей Владимирович			

## **Introduction**

The widespread use of adjustable speed ac motor-drive systems in numerous critical industrial, manufacturing, and transportation applications has escalated the importance and the significance of developing rigorous fault mitigation/remedial techniques or fault tolerant capabilities for such types of systems. Fault tolerant electric drive systems are required in numerous industrial and medical life support systems, electromechanical automation equipment, propulsion and actuation, heating, ventilation, and air-conditioning systems, as well as automotive/transportation, marine, and aerospace systems. In these vital and critical applications, the reliability of adjustable speed induction motor drive systems is of paramount importance in ensuring a continuous and almost disturbance-free operation under any motor-drive fault conditions. Accordingly, such fault tolerant capabilities will entail the reduction in maintenance costs, downtimes, and more importantly the avoidance of catastrophic motor-drive failures, with their potential costly and fatal consequences. Nevertheless, permanently reduced system performance and short operating times under faulty conditions are sometimes accepted as a compromise, given the fact that the drive system continues operating without causing any undesired disturbance to the critical load being driven. The power semiconductor error account for around 35% of all errors. In fact, this percentage can be higher if the control circuit faults were taken into account, which may consist of faults such as inverter intermittent misfiring due to defects in control circuit elements or electromagnetic interference that results in gate-drive open faults, and consequently leads to transistor open-circuit switch faults. Therefore, the need to design fault tolerant systems is highly desirable. Due to the major concern for the need to design highly reliable and fault tolerant adjustable speed ac motor-drive systems, extensive research has been dedicated towards this field. This direction of research is done by Russian [2, 3] and foreign [1] scientists. Parallel redundancy and conservative design techniques have been widely adopted in the drives to improve their immunity from faults, thereby maintaining the continuity of operation under a

variety of faulty conditions. Despite the fact that multiphase (more than three phases) drives, as a system redundancy means, provide acceptable fault tolerant capability by ensuring a continuous and almost disturbance free operation, the tradeoff lies in the increased system cost and size of such systems. To minimize the cost as a consequence of system redundancy, a lot of attention has been paid to developing intelligent fault mitigation control methods, along with the appropriate hardware modifications to conventional three phase adjustable-speed drives. An overview of the existing solutions along with their merits and drawbacks discussed there. The fault tolerant drive system concept is that it will continue to operate in a satisfactory manner after sustaining a fault. The term “satisfactory” implies a minimum level of performance after the fault, and will therefore be heavily influenced by system requirements.

### **Fault tolerant topology**

This text will limit itself to comparing fault tolerant topologies where the faults remain within the power inverter stage. The faults under consideration are:

- 1) single inverter switch short-circuit;
- 2) phase-leg short-circuit;
- 3) single inverter switch open-circuit;
- 4) single-phase open-circuit (internal or external to inverter).

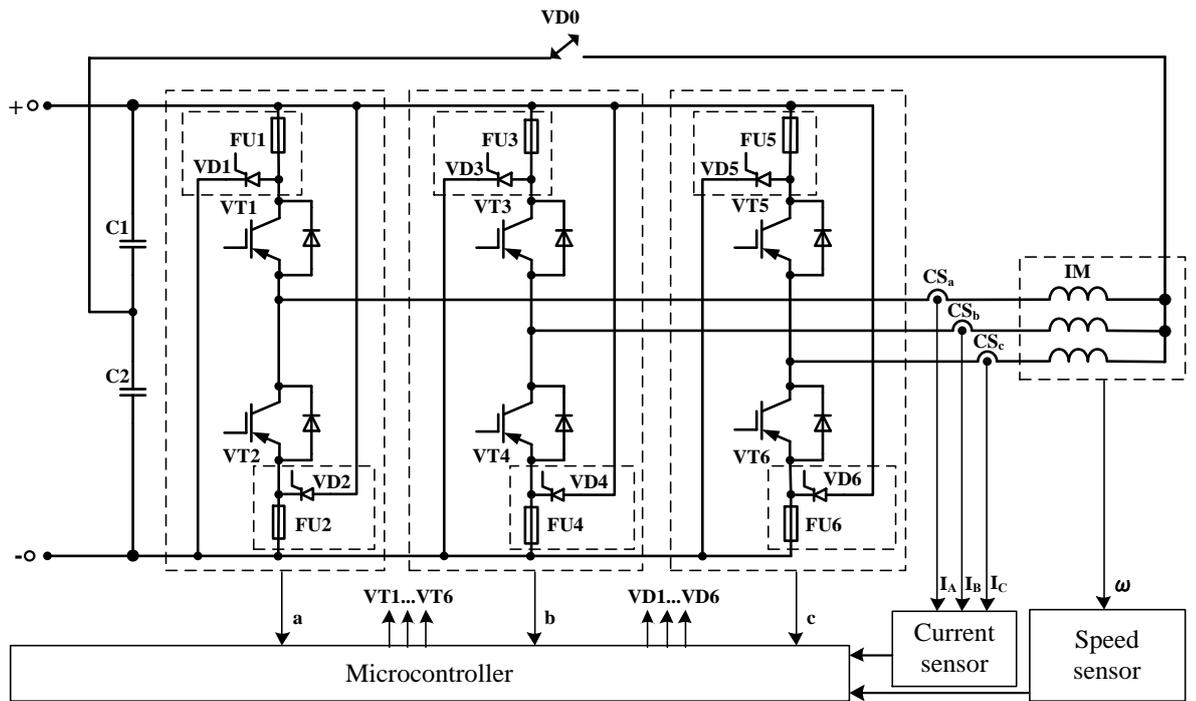


Fig. 1 Fault tolerant inverter topology

The inverter topology illustrated in Fig. 1 was proposed by [4]. It is based on modifying the post-fault control strategy with the connection of the motor neutral to the mid-point of the split dc bus capacitor link of the drive. This topology is capable of mitigating both transistor open-circuit and short-circuit switch faults. It utilizes a conventional three phase drive with the addition of seven triacs or back-to-back connected SCRs and six fast acting fuses connected in series with the transistors VT1-VT6. The motor neutral is connected to the midpoint of the split dc link through the triac VD0. The six other triacs, VD1-VD6, as well as the six fuses, FU1-FU6, are used for fault isolation purposes. In the pre-fault operation, all triacs are turned-off and the motor-drive system functions in its normal condition. During the post-fault operation, the faulty inverter leg is first isolated using a fault isolation scheme described. Thus the motor operates in a two-phase mode with its neutral point connected to the mid-point of the split dc link by turning-on triac, VD0. The need for the neutral point connection is to allow the individual control of the amplitude and phase of the currents in the remaining two healthy phases. In order to maintain the rated motor performance and the same torque production, the currents in the remaining two

healthy phases should be regulated to a magnitude of 3 times their original value, and phase-shifted 60 degrees with respect to each other. It had been shown that this post-fault control method allows the motor to maintain its normal three-phase motor performance. Despite the fact that this fault tolerant topology ensures the same rated motor performance, there are still some demerits associated with this method. One drawback is the required accessibility of the motor neutral, which is not normally provided by motor manufacturers except by special request. Also, this method is not appropriate to delta-connected motors. A second drawback is associated with the necessity to increase the fundamental rms motor phase current magnitude in the strong phases under faulty conditions, which implies that the drive and the motor have to be overrated to withstand this higher level of current for at least a significant period of time. Also, the neutral current is no longer zero. It is comprised of the sum of the currents in the remaining two healthy phases which results in three times the value of the original phase current during the healthy operation mode. This poses a third drawback owing to the presence of single-phase circulating neutral current through the dc bus capacitors which will cause severe voltage fluctuations that may degrade the performance of the drive in the form of increased winding ohmic losses and motor torque ripples. Hence, a larger size dc capacitor is required to sustain the desired voltage level and minimize the voltage ripples.

The second fault tolerant inverter topology to be discussed in this article is based on redundancy concept for induction motor applications.

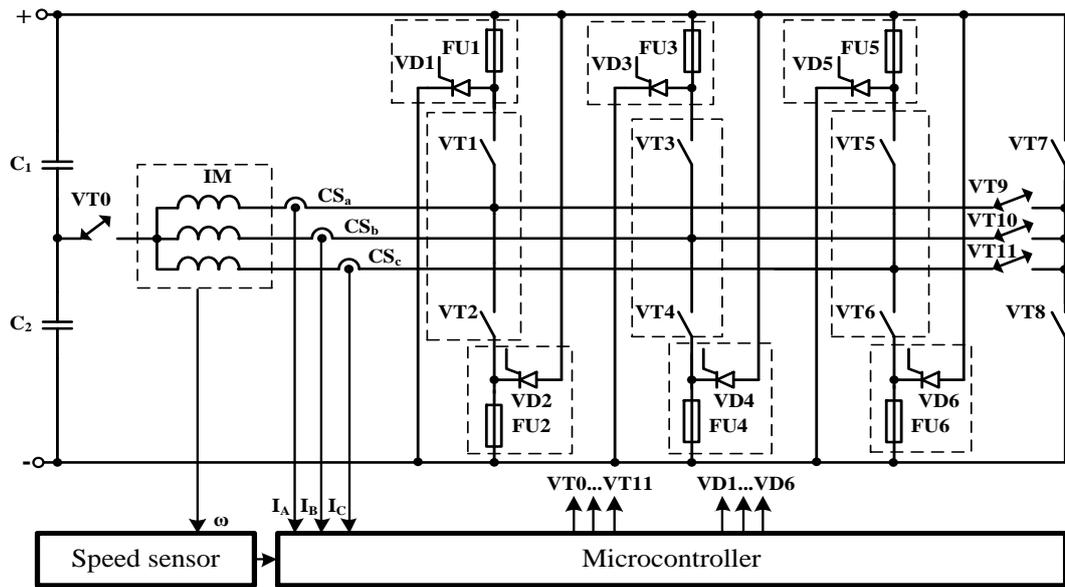


Fig. 2 Fig. 1 Fault tolerant inverter topology for transistor open-circuit and short-circuit switch faults

It is important to mention that the topology of Fig. 2 is capable of providing fault tolerance to transistor open-circuit and short-circuit switch faults. The operation of the topology of Fig. 2 is straightforward. When either a transistor open-circuit or short-circuit switch fault has been detected and diagnosed, the faulty transistor switch will be isolated first and the fourth inverter leg will be activated for usage by turning-on the associated triac. Since all three phases of the motor are connected to the inverter during the pre and post-fault operations, the current amplitude in each of these phases remains the same in order to ensure a smooth torque production. Unfortunately, the topology of Fig. 2 involves a large number of circuit components for the fault isolation scheme.

### Mathematical model

There are two different modes under considering emergency two-phase mode of three-phase induction motor:

- emergency operation with an elliptical field of the induction motor;

- emergency operation with algorithmic forming a circular rotating field in the variable frequency drive [1].

The purpose of this section is to design a mathematical model of the induction motor, which takes into account the impact of the elliptic field in the phase loss operate mode with bound or decoupled phases of the stator.

Ongoing processes in the stator which are in phase operate mode are definitely depend on the stator's wiring midpoint and the natural of power source. The remaining two phases are connected in series and connected to the line voltage when the motor under the scheme with bound phases [2] in case of occurrence emergency situation. The same current is stator but current is absent in turned off the winding (Figure 3).

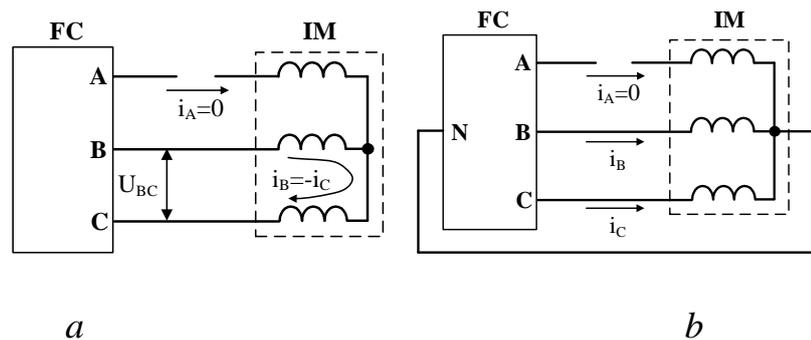


Fig. 3. The current flow in the motor windings after phase "A" loss for wiring diagrams phases: a - bound, b - decoupled

Field can be decomposed into the direct and reverse sequence field using the symmetrical components method when considering emergency two-phase mode of the motor with an elliptical field in the air gap. Generalized model of the electric machine takes into account only the direct field. There are two variants of the induction motor model representation operating with an elliptical field - an electric machine generalized model with two stators and two rotors, an electric machine generalized model with two stators and one rotor [3]. The first model is a simple in description, but does not give accurate results of modelling transient processes. The second

model has a more complicated expressions for the resulting electromagnetic torque, but gives more accurate results of calculations in dynamic modes.

Model with two stators and two rotors (Fig. 4) is used for generating a mathematical model in connection with the above mentioned features of the mathematical description of the generalized elliptic machine with electric field.

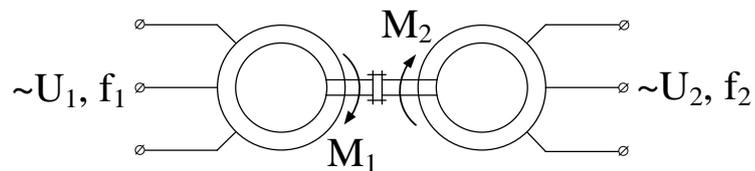


Fig. 4 the electrical machine Scheme with two stators and two rotors

Lead to a two-phase machine is approach because the field in the gap of the two-phase and multi-phase machines in these conditions differ from each other [3], in a study of asymmetric machine taking into account the spatial harmonics or in the presence of non-sinusoidal supply voltages. Generalized electric machine in three-phase coordinate system can be adopted as a mathematical model as the induction motor is asymmetric with loss of one phase voltage.

Generally accepted assumptions and limitations associated with the concept of "idealized machine" are used in the equations preparation and considering induction machines transient processes : the machine is not saturated; losses in the steel is neglected; phase windings are symmetrical and are shifted by an angle of 120 electrical degrees; magnetizing force of windings and magnetic field distributed sinusoidal along the circumference of the air gap; air gap is uniform; rotor is symmetrical.

As a basis there was taken the induction motor control model which is inhibited in the coordinate system. Equations for the fields of direct and reverse sequences are separate systems to simplify the calculations.

In determining the voltages applied to the winding machines, responsible for the field of direct and reverse sequence, keep in mind that for a constant supply

voltage  $U_1=U_A=U_B=U_C=\text{const}$  voltage positive and negative sequence depends on the slip [3].

Write down equation solving a system of equations with respect to derivatives of linkages and simplify it by going on the phase values to linear, denoting  $U_A-U_B=U_{AB}$ ,  $U_B-U_C=U_{BC}$ ,  $U_C-U_A=U_{CA}$ .

It's a formula for the case of decoupled phase field equations of direct

$$\frac{d\Psi_{1A}}{dt} = U_{1A} - R_s \cdot i_{1A};$$

$$\frac{d\Psi_{1B}}{dt} = U_{1B} - R_s \cdot i_{1B};$$

$$\frac{d\Psi_{1C}}{dt} = U_{1C} - R_s \cdot i_{1C};$$

$$\frac{d\Psi_{1a}}{dt} = -R_s \cdot i_{1a} - \frac{(\Psi_{1b} - \Psi_{1c}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1b}}{dt} = -R_s \cdot i_{1b} - \frac{(\Psi_{1c} - \Psi_{1a}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1c}}{dt} = -R_s \cdot i_{1c} - \frac{(\Psi_{1a} - \Psi_{1b}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

For bound phase:

$$\frac{d\Psi_{1AB}}{dt} = U_{1AB} - R_s \cdot i_{1AB};$$

$$\frac{d\Psi_{1BC}}{dt} = U_{1BC} - R_s \cdot i_{1BC};$$

$$\frac{d\Psi_{1CA}}{dt} = U_{1CA} - R_s \cdot i_{1CA};$$

$$\frac{d\Psi_{1ab}}{dt} = -R_s \cdot i_{1ab} - \frac{(\Psi_{1bc} - \Psi_{1ca}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1bc}}{dt} = -R_s \cdot i_{1bc} - \frac{(\Psi_{1ca} - \Psi_{1ab}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1ca}}{dt} = -R_s \cdot i_{1ca} - \frac{(\Psi_{1ab} - \Psi_{1bc}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

Expressions for the fields reverse sequence will have a similar form.

Record presented the equations system in the Cauchy form is difficult if taking into account the flux linkage substituting expressions for the currents, matrix notation system is used to simplify it.

For the case decoupled phase the final expressions for field equations for direct and reverse sequences are as follows:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left[ [R] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}$$

$$\frac{d[i_2]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \left[ [R] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_2] \right\}$$

For the case bound phase the final expressions for field equations for direct and reverse sequences are as follows:

$$\frac{d[i_{1L}]}{dt} = [L_{1L}]^{-1} \cdot \left\{ [U_{1L}] - \left[ [R_L] + [L_{2L}] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}$$

There are the equations for reverse below –

$$\frac{d[i_{2L}]}{dt} = [L_{1L}]^{-1} \cdot \left\{ [U_{2L}] - \left[ [R_L] + [L_{2L}] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_2] \right\}$$

$[I_{1L}], [I_{2L}], [I_1], [I_2]$  – linear and phase currents matrix of the stator and rotor direct and reverse sequences;  $[U_{1L}], [U_{2L}]$  – linear voltage direct and reverse sequence matrix,  $[L_{1L}], [L_1]$  – stator inductance matrix for bound and decoupled phases,

$[L_{1L}]^{-1}$ ,  $[L_1]^{-1}$  – inverse matrix;  $[L_{1L}]$ ,  $[L_1]$ ;  $[R]$ ,  $[R_L]$  – phase and linear resistors matrix;  $p$  – number of pairs of poles.

$$[I_{1L}] = \begin{bmatrix} I_{1A} - I_{1B} \\ I_{1B} - I_{1C} \\ I_{1C} - I_{1A} \\ I_{1a} - I_{1b} \\ I_{1b} - I_{1c} \\ I_{1c} - I_{1a} \end{bmatrix}; [U_{1L}] = \begin{bmatrix} U_{1A} - U_{1B} \\ U_{1B} - U_{1C} \\ U_{1C} - U_{1A} \\ U_{1a} - U_{1b} \\ U_{1b} - U_{1c} \\ U_{1c} - U_{1a} \end{bmatrix}; [I_{2L}] = \begin{bmatrix} I_{2A} - I_{2B} \\ I_{2B} - I_{2C} \\ I_{2C} - I_{2A} \\ I_{2a} - I_{2b} \\ I_{2b} - I_{2c} \\ I_{2c} - I_{2a} \end{bmatrix}; [U_{2L}] =$$

$$\begin{bmatrix} U_{2A} - U_{2B} \\ U_{2B} - U_{2C} \\ U_{2C} - U_{2A} \\ U_{2a} - U_{2b} \\ U_{2b} - U_{2c} \\ U_{2c} - U_{2a} \end{bmatrix};$$

$$[I_1] = \begin{bmatrix} I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \\ I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \\ U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \end{bmatrix}; [I_2] = \begin{bmatrix} I_{2A} \\ I_{2B} \\ I_{2C} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix}; [U_2] = \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ U_{2C} \\ U_{2a} \\ U_{2b} \\ U_{2c} \end{bmatrix};$$

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & \frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m \\ L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & \frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R \end{bmatrix};$$

$$[L_2] =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L_{1L}] = \begin{bmatrix} L_S + \frac{1}{2}L_m & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_S + \frac{1}{2}L_m & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_S + \frac{1}{2}L_m & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_m \\ \frac{3}{2}L_m & 0 & 0 & L_R + \frac{1}{2}L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & 0 & 0 & L_R + \frac{1}{2}L_m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}L_m & 0 & 0 & L_R + \frac{1}{2}L_m \end{bmatrix};$$

$$[L_{2L}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}L_m & \frac{3}{2}L_m & -3L_m & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -2(L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ -3L_m & \frac{3}{2}L_m & \frac{3}{2}L_m & -2(L_R + \frac{1}{2}L_m) & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ \frac{3}{2}L_m & -3L_m & \frac{3}{2}L_m & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -2(L_R + \frac{1}{2}L_m) & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \end{bmatrix};$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_L] = \begin{bmatrix} R_S & -R_S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_S & -R_S & 0 & 0 & 0 \\ -R_S & 0 & R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & -R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & -R_r \\ 0 & 0 & 0 & -R_r & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

Reverse sequence field in the air gap are absent and corresponding equations are not involved in the calculations when operating in the three-phase mode.

It's necessary to enter the matrix failure which which is allowing to provide a two-phase switches to emergency mode for simulating the stator phase failure in the initial expressions for the field equations of direct and reserve sequence:

$$[M_O] = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [M_{OL}] = \begin{bmatrix} \bar{a} & \bar{b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & \bar{c} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{a} & 0 & \bar{c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

The final expression for the active resistance matrix will look as follows:

$$[R_M] = ([1] + k_\infty[M_0])[R]$$

$$[R_{ML}] = ([1] + k_\infty[M_{0L}])[R_L]$$

$[R_M]$ ,  $[R_{ML}]$  – phase and linear resistance matrix after failure;  $[1]$  – identity matrix of size 6 to 6,  $k_\infty$  - coefficient of simulating the introduction of a high resistance in the circuit of the stator.

The expressions for the field equations for direct and reverse sequence will be as follows, respectively:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left[ [R_M] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}$$

$$\frac{d[i_2]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \left[ [R_M] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_2] \right\}$$

There are expressions for the case of bound phases below –

$$\frac{d[i_{1L}]}{dt} = [L_{1L}]^{-1} \cdot \left\{ [U_{1L}] - \left[ [R_{ML}] + [L_{2L}] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}$$

$$\frac{d[i_{2L}]}{dt} = [L_{1L}]^{-1} \cdot \left\{ [U_{2L}] - \left[ [R_{ML}] + [L_{2L}] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_2] \right\}$$

Electromagnetic torque  $M_1$  and  $M_2$  are by fields direct and reverse sequences are defined by the following expressions:

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1}i_{c1} + i_{B1}i_{a1} + i_{c1}i_{b1}) - (i_{A1}i_{b1} + i_{B1}i_{c1} + i_{c1}i_{a1})]$$

$$M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2}i_{c2} + i_{B2}i_{a2} + i_{c2}i_{b2}) - (i_{A2}i_{b2} + i_{B2}i_{c2} + i_{c2}i_{a2})]$$

Equation of the drive's motion, which takes into account torque of direct aequenca

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_1 - M_2 - M_c);$$

The mathematical model of system equations to describe the transient processes in the emergency phase loss operate mode in induction motors with the inclusion of bound and decoupled phases.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}(z \cdot [i_{1L}] + \bar{z} \cdot [i_1]) = (z \cdot [L_{1L}]^{-1} + \bar{z} \cdot [L_1]^{-1}) \cdot \\ \cdot \left\{ (z \cdot [U_{1L}] + \bar{z} \cdot [U_1]) - \left[ (z \cdot [R_{ML}] + \bar{z} \cdot [R_M]) + (z \cdot [L_{2L}] + \bar{z} \cdot [L_2]) \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}; \\ \frac{d}{dt}(z \cdot [i_{2L}] + \bar{z} \cdot [i_2]) = (z \cdot [L_{1L}]^{-1} + \bar{z} \cdot [L_1]^{-1}) \cdot \\ \cdot \left\{ (z \cdot [U_{2L}] + \bar{z} \cdot [U_2]) - \left[ (z \cdot [R_{ML}] + \bar{z} \cdot [R_M]) + (z \cdot [L_{2L}] + \bar{z} \cdot [L_2]) \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_2] \right\}; \\ [R_M] = ([1] + k_\infty[M_0]) \cdot [R]; \\ [R_{ML}] = ([1] + k_\infty[M_{0L}]) \cdot [R_L]; \\ T_\Pi = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_1 - M_2 - M_c); \\ T_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1}i_{c1} + i_{B1}i_{a1} + i_{C1}i_{b1}) - (i_{A1}i_{b1} + i_{B1}i_{c1} + i_{C1}i_{a1})]; \\ T_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2}i_{c2} + i_{B2}i_{a2} + i_{C2}i_{b2}) - (i_{A2}i_{b2} + i_{B2}i_{c2} + i_{C2}i_{a2})]; \end{array} \right. \quad (1)$$

There is a single value for the bound phase coefficient of z and zero for the decoupled phase, Tp - is the switching structure time of electric drive, t1- is the point during time failure detection, t2 – is the point in time recovery of a circular rotating field, ω – is the speed, T1, T2 – are the electromagnetic torque fields direct and reverse sequence, Tc – is the motor drag torque, J – is the moment of electric inertia, p- is the number of pole pairs, Ls, LR – are the inductance of the stator and rotor, Lm –is the mutual inductance.

## Simulation and experiment

The condition for the existence of a circular rotating field in an electric machine with two arbitrarily shifted in space windings is known[5]:

$$\delta + \beta = \pi; F_{AM} = F_{CM}; \text{ (eq. 1)}$$

$F_{AM}$ ,  $F_{CM}$  – is the amplitude values of magnetomotive forces,  $\delta$  – is the angle spatial shift coils,  $\beta$  – is the angle time shift winding currents asymmetric biphasic electrical machine. Spatial angle shift winding is constant and equal to  $\delta = 2\pi/3$  in the 3-phase electric machine, the time phase shift can be specified as  $\beta = \pi/3$ . In this case, the amplitude values of magnetomotive force of asymmetric two-phase motor are equal  $F_{AM}=F_{CM}=F_M$  and circular rotating field is formed in the air gap of the motor.

This condition involves technical solutions with different algorithms for induction motors (IM). It's able to operate with a leading or lagging phase angles for working shift currents on  $\pi$  [7],  $\pi/3$  [8] radians and non-sinusoidal currents [9, 10] for the scalar motor control. In the case of vector control is necessary to use the electric coordinate transformation [11]. This approach is allows to generate additional redundancy on the basis of the functional reserve of three-phase electric drive and keep it running at an emergency two-phase operation mode. A further increase in redundancy three-phase electric drive associated with the use of structural reserve [12].

Simulation model in Matlab Simulink was designed on the basis of a mathematical model (1). The results of modelling the transition process of switching from working three-phase mode in two-phase emergency mode are shown in fig. 5 for the case of vector control and fig. 6 for the case of scalar control.

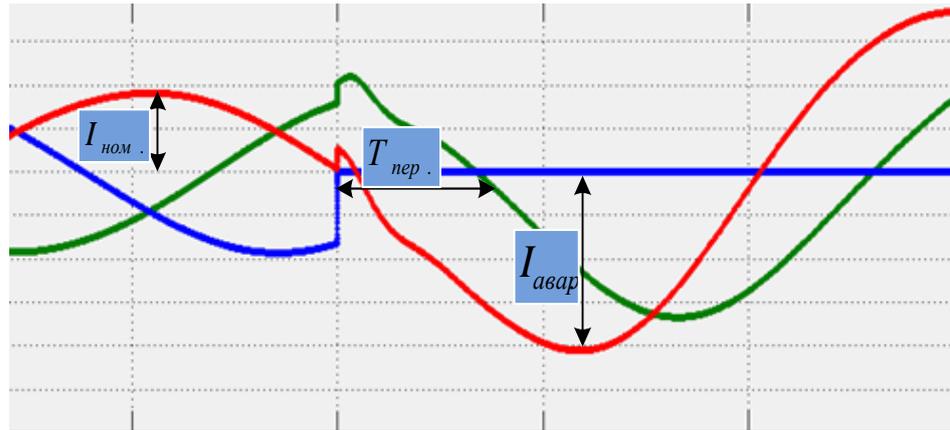


Fig. 5. The transition process of switching from working three-phase mode in two-phase emergency mode for the case of vector control

From the simulation results comparison there can be seen the after emergency shutdown of motor phase in the time interval  $T_p$ - switching time is determined by the structure of electric drive from  $t_1$ - points in time failure detection to  $t_2$  - point in time recovery of a circular rotating field for the case of vector and scalar control is different and is not more than 4.6 ms for the case of vector control and 8.2 ms for the scalar control. The end of the process of switching the structure of electric drive is determined by the condition of the displacement vectors MMF formed by phase currents, from the value of  $2\pi/3$  in the three-phase mode to the value  $\pi/3$  in two-phase mode.

### Fault tolerant control algorithm for IM drive

The Emergency states induction motor electric drive's investigation as a technical object's part of dangerous manufactories like nuclear, military, chemistry or medicine involves consideration of the electric drive operation in phase loss operate mode. Emer-

gency shutdown of such drives may impair the safe operation of the equipment at risk to staff with large economic losses.

Fault tolerance control of induction motor electric drive involves the development of algorithms for operation recovery with full or partial recovery and providing a rotating magnetic field. The main purpose of this article is to design algorithms for fault-tolerant control of induction motor electric drive with scalar and vector control on the basis of control system simulation.

Condition (eq. 1) involves technical solutions with different algorithms for induction motors (IM). It's able to work with a leading or lagging phase angles for working shift currents on  $\pi$  [3],  $\pi/3$  [4] radians and non-sinusoidal currents [5, 6] for the scalar motor control. In the case of vector control is necessary to use the electric coordinate transformation [7]. This approach is allows to generate additional redundancy on the basis of the functional reserve of three-phase electric drive and keep it running at an emergency two-phase operation mode. A further increase in redundancy three-phase electric drive associated with the use of structural reserve [8].

The classification of designed algorithms fault-tolerant control of induction motor electric drive is shown in fig. 8 and table. 1. There are the positions of the current vector in unbalance mode with currents shear on  $\pi$  and  $\pi / 3$  radians for lagging and leading phase in case of failure in phases A, B, C, with maintaining a circular rotating field.

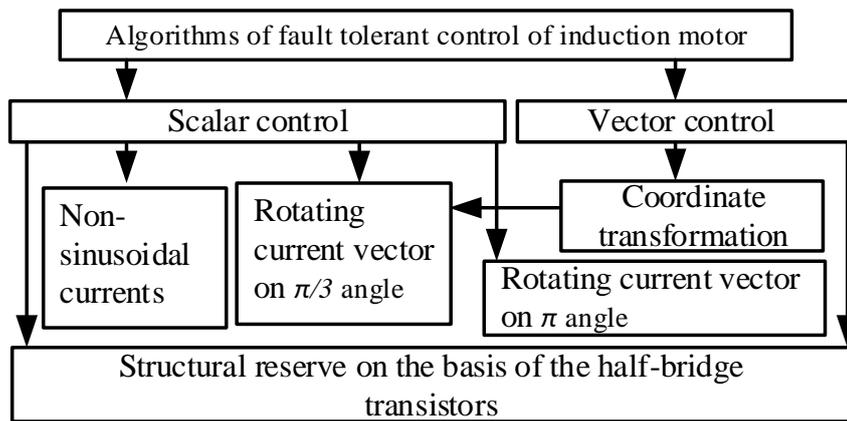


Fig. 8. The algorithms classification for the fault-tolerant control of induction motor electric drive

Table 1. The current vector positions in unbalance mode with currents shear on  $\pi$  and  $\pi / 3$  radians for lagging and leading phase in case of failure in phases A, B, C

B, C

	Shift of current vector on $\pi$ radians		Shift of current vector on $\pi/s$ radians	
	Laggingphase	Leadingphase	Laggingphase	Leadingphase
Failur eofph ase «A»				
Failur eofph ase «B»				
Failur eofph ase «C»				

IM Operation recovery algorithm with current vector shift on  $\pi/s$  radian

### IM Operation recovery algorithm with non-sinusoidal current

It's possible to restore three-phase motor performance when the conditions of equality the equality conditions of active power to the P3 and P2 increase in current in the remaining phases k times after the failure in the case of n corresponding::

$k=P_3/P_2$  for the condition:  $P_3=kP_2$ , therefore for failure in phase «A», the expression (1) for the coefficient  $k$ :

$$k = \frac{P_2}{P_3} = \frac{I_{2\Sigma}}{I_{3\Sigma}} = \frac{\frac{3}{2}}{\bar{b} \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{c} \sin\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)}.$$

Non-sinusoidal currents are formed in electric drive control system by following equations:

$$I_b = \frac{\frac{3}{2}I_m \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)}{\bar{b} \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{c} \sin\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)}; I_c = \frac{\frac{3}{2}I_m \sin\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)}{\bar{b} \sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{c} \sin\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)},$$

$I_m$  – the amplitude of the generated phase currents  $I_A, I_B, I_C$ , A;

induction motor drive fault tolerant vector control

The above algorithms are useful for disaster recovery control systems with scalar control and can not be applied directly to electric drive control systems with vector control. Vector control system of electric drive in phase loss operate mode made under the scheme with decoupled phases is unusable. Operation recovery can be achieved by adding a vector control system in the current coordinate converter that implements the recovery algorithm in accordance with the bits from the matrix of failures. Vector control system is shown in Fig. 9. It comprises a flux, speed and three current regulators. The reference signal on the current from the speed and the flux regulator flows in a coordinate converter which converts from the rotating coordinate system  $x, y$  to the fixed coordinate system  $a, b$ . Further, depending on the operating mode is converted according to the equations (3).

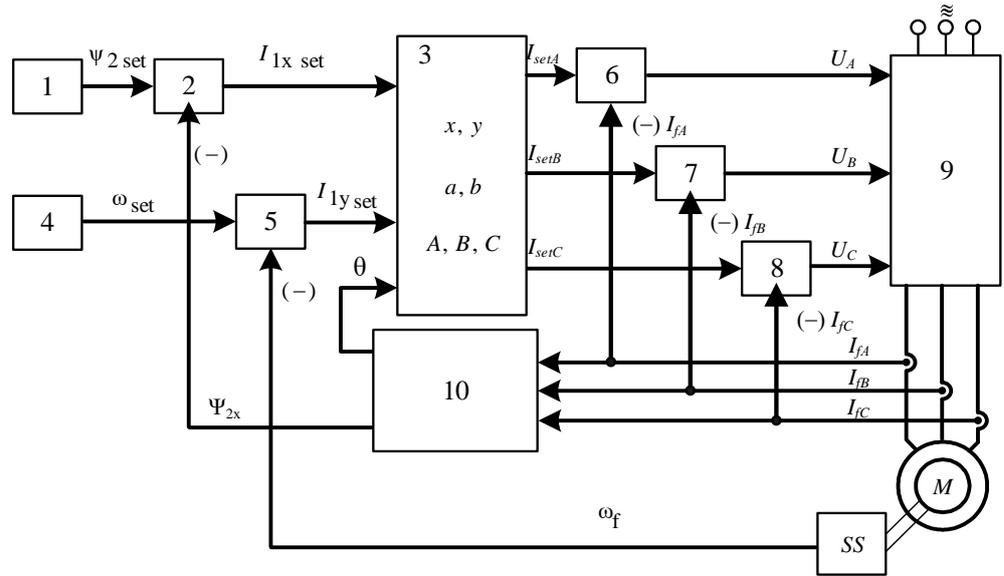


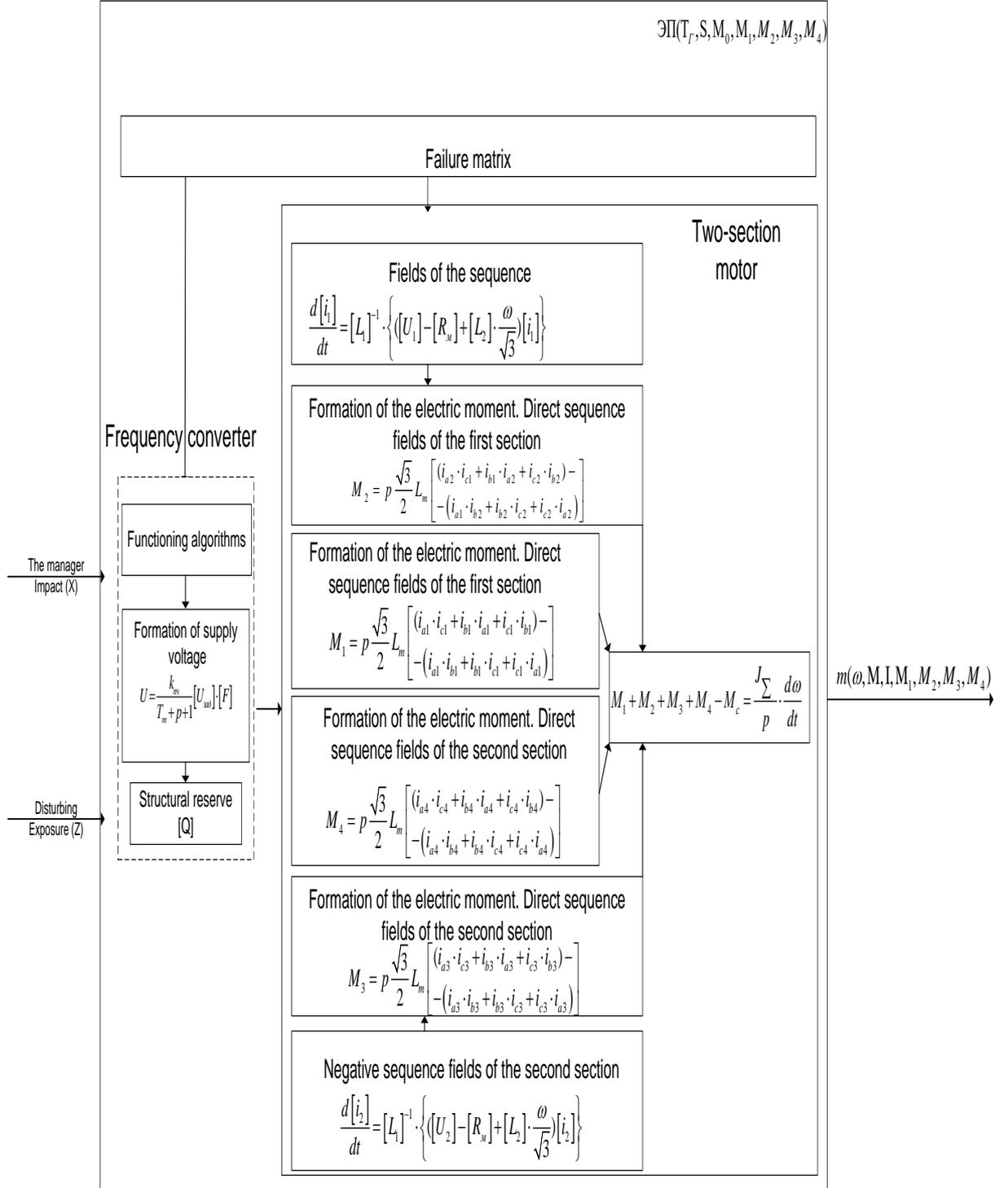
Figure 9. fault-tolerant induction motor drive vector control system: 1 - dial rotor flux linkage; 2 - the rotor flux linkage regulator; 3 - coordinate converter; 4 - speed dial; 5 - speed regulator; 6, 7, 8 - stator current regulators; 9 - frequency converter; 10 - calculating unit flux.

General expression for coordinate transformation that takes into account the drive operate mode and shift of current vector on  $\pi/s$  radians for the leading phase [9]:

$$\begin{bmatrix} \bar{a} \cdot k_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} \cdot k_d & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} \cdot k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/3 \cdot c) & \sin(\pi/3 \cdot c) & 1 \\ \cos(-2\pi/3 - \pi/3 \cdot a) & \sin(-2\pi/3 + \pi/3 \cdot a) & 1 \\ \cos(2\pi/3 - \pi/3 \cdot b) & \sin(2\pi/3 + \pi/3 \cdot b) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix},$$

or for the lagging phase current vector:

$$\begin{bmatrix} \bar{a} \cdot k_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} \cdot k_d & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} \cdot k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \\
= \begin{bmatrix} \cos(-\pi/3 \cdot c) & \sin(-\pi/3 \cdot c) & 1 \\ \cos(-2\pi/3 - \pi/3 \cdot a) & \sin(-2\pi/3 - \pi/3 \cdot a) & 1 \\ \cos(2\pi/3 - \pi/3 \cdot b) & \sin(2\pi/3 - \pi/3 \cdot b) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix}$$



## Conclusions

There was designed an induction motor electric drive fault tolerant control Algorithms in phase loss operate mode with scalar control, non-sinusoidal currents and shift current vectors at angles  $\pi/3$  and  $\pi$  radians for leading and lagging phase. The best results were obtained for the fault tolerant control algorithm and scalar control with leading phase shifting of current on  $\pi/3$ , speed dip was 5.69% at the time of the accident.

The fault tolerant control algorithms of induction motor electric drive are designed in phase loss operate mode with vector control, non-sinusoidal currents and shift current vectors at angles  $\pi/3$  and  $\pi$  radians for leading and lagging phase.)The best results were obtained for the fault tolerant control algorithm and vector control with shifting of leading phase of current on  $\pi/3$ , there are no speed dips at the time of the accident.

It is established that reduction the angular rotation path of the current vector with  $\pi$  to  $\pi / 3$  radians, and direction choice opposite to the rotor motion vector current helps reduce dip at speed at the time of the accident.

## REFERENCES

1. [Chia-Chou Yeh](#) «Induction Motor-Drive Systems with Fault Tolerant Inverter-Motor Capabilities». - [Electric Machines & Drives Conference, 2007](#). Dept. of Electr. & Comput. Eng., Marquette Univ., Milwaukee, WI [Demerdash, N.A.O.V.:](#) 2 P.: 1451 - 1458
2. Konev Yu.I. Microelectronic electrical system. Applications in electronics. Moscow, Radio and Communications Publ., 1987. 240 p.
3. Juferov F M 1988 Electric motors for automatic devices High school 479
4. G. Odnokopylov, I. Odnokopylov RF Patent No. 2007112527, Byull. Izobret., No. 16 (2008).
5. G. Odnokopylov, I. Odnokopylov, Yuri Dementyev RF Patent No. 2460190, Byull. Izobret., No. 24 (2011).
6. Odnokopylov G.I., Fault tolerant control of multi-phase induction motor electric drive with non-sinusoidal current. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. no. 4 (2013): 151-154.
7. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant induction motor electric drive. Polzunovsky Vestnik. no. 3 (2013): 157-162.
8. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Vector fault tolerant control of induction motor electric drive. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. no. 2 (2013): 327-330.
9. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Principles of providing survivability of induction motor electric drive based on reserve elements. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. no. 4 (2013): 133-137.