

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

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Отказоустойчивый асинхронный электропривод для гибридного транспортного средства</b>

УДК 629.33/37-83.-027.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Сенькив Елена Петровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Георгий Иванович	Д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Юрий Николаевич	PhD, к.т.н.		

Томск – 2018 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Электропривод и системы управления электроприводом

Код ре- зультата	Результат обучения
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты 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 инженерные исследования в области электро-энергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование 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.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными доку- ментами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, 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»**

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль – Электропривод и системы управления электроприводом

УТВЕРЖДАЮ:

Рук. отделением

\_\_\_\_\_ Дементьев Ю.Н.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Ж	Сенькив Елена Петровна

Тема работы:

<b>Отказоустойчивый асинхронный электропривод для гибридного транспортного средства</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <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; эко- номический анализ и т. д.).</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>– предусмотреть мониторинг отказов типа: обрыв фазы двигателя, «невыхлождение» 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 электро- привода;</li><li>– разработать схемные решения по построению отказоустойчивого электропривода для опасного производственного объекта</li><li>– предусмотреть функционирование электропривода с функциональным и структурным резервом.</li></ul>
--	--

	– разработать имитационную модель отказоустойчивого асинхронного электропривода для исследования неполнофазных и аварийных режимов работы в гибридном транспортном средстве.
--	--

<p align="center"><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 аварийных ситуаций асинхронного электропривода для гибридного транспортного средства. Заключение</p>
---	--

<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Функциональная и структурная схемы.</li> <li>2. Имитационная модель.</li> <li>3. Результаты исследований.</li> </ol>
---	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко А.А.
«Социальная ответственность»	Амелькович Ю.А.
Раздел на иностранном языке	Соколова Э.Я.

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

Введение; обзор литературы по вопросу отказоустойчивого электропривода; составление математической модели отказоустойчивого асинхронного электропривода для гибридного транспортного средства; заключение.

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Сенькив Елена Петровна		

## Реферат

Магистерская диссертация студента состоит из 120 страниц, 23 рисунка, 20 таблиц, 29 источников, 1 страниц 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, резервирование, отказоустойчивость, свойство живучести.

Объектом исследования является отказоустойчивый асинхронный электропривод.

Цель работы: Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом, построение имитационной модели асинхронного электропривода для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы, разработка алгоритмов отказоустойчивого управления для электропривода.

Подобные исследования могут найти применение в особенности для промышленного оборудования опасных производственных объектов: ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, где возникает проблема организации отказоустойчивого управления исполнительными электроприводами с обеспечением свойства живучести.

Работа выполнена с использованием пакета прикладных программ: Microsoft Office 2013, Mathcad 14, MathType 6.0, MatLab R2017b.

## Обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель;

ТС – техническая система;

КПД – коэффициент полезного действия;

ПЧ – преобразователь частоты;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ХХ – холостой ход;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭДС – электродвижущая сила;

ПК - персональный компьютер;

СИЗ - средства индивидуальной защиты;

ПУЭ - правила устройства электроустановок;

ПБ - правила безопасности;

ТИ - научно-техническое исследование;

НР - научный руководитель.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5АМ6Ж	Сенькив Елене Петровне

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Подразделение</b>	<b>Отделение электроэнергетики и электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<p>1. <i>Стоимость ресурсов: материально-технических, энергетических, финансовых, и человеческих.</i></p>	<p>1. <i>Определить затраты на разработку проекта, в которую входят:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Материалы и покупные изделия</i></li> <li>- <i>Основная заработная плата</i></li> <li>- <i>Дополнительная заработная плата</i></li> <li>- <i>Отчисления в социальные фонды</i></li> <li>- <i>Прочие и накладные расходы</i></li> </ul> <p>2. <i>Для исследования необходимо два человека: руководитель, студент.</i></p>
<p>2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.</i></p>	<p><i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30 %</i></p>

**Список вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p>1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i></p>	<p><i>Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)</i></p>
<p><i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i></p>	<p><i>Разработка календарного плана работ, сметы расходов.</i></p>

**Список графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

1. *Расходы на этапе проектирования на материальные затраты.*
2. *Расходы на этапе проектирования на заработную плату.*
3. *Смета затрат.*
4. *Смета наличных капитальных затрат.*
5. *Результаты расчёта приведённых затрат.*

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	К.Э.Н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Сенькив Елена Петровна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5АМ6Ж	Сенькив Елена Петровна

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Подразделение</b>	<b>Отделение электроэнергетики и электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является математическая модель отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом, построение имитационной модели асинхронного электропривода для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы, разработка алгоритмов отказоустойчивого управления для электропривода. Подобные исследования могут найти применение в особенности для промышленного оборудования опасных производственных объектов: ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, где возникает проблема организации отказоустойчивого управления исполнительными электроприводами с обеспечением свойства живучести.</p>
---	--

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

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой</p>	<p>Воздействие на работника физических факторов, таких как, производственные метеоусловия; недостаточная освещенность; запыленность; повышенный уровень шума; неравномерность распределения яркости в поле зрения; повышенная яркость светового изображения. Электроопасность.</p>
---	--



<p>произведённой среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электроопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> </ul> <p><b>1. пожаровзрывобезопасность</b> (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>	
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- защита селитебной зоны</li> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Утилизация компьютерной техники. Отходы, образующиеся при поломке ПЭВМ, внешних устройств ЭВМ. Этапы утилизации компьютерной техники.</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p><u>Возможные ЧС:</u>          Возможны возгорания в следствии короткого замыкания из-за ошибки оператора и нарушения целостности электрических проводов. Наиболее типичным ЧС будет пожар в помещении. Предупреждающие мероприятиями являются наличие плана эвакуации на месте работы оператора, знание и соблюдение мер пожарной безопасности работниками, установка заземлителей.</p>
<p><b>4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>
<p><b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b></p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата

5AM6Ж	Сенькив Елена Петровна		
-------	------------------------	--	--

Оглавление	
Введение.....	14
ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	17
1.1 Постановка задачи.....	17
1.2 Анализ известных методов обеспечения асинхронного электропривода свойством живучести.....	17
1.3 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства живучести.....	20
1.4. Обзор схмотехнических решений зарубежных ученых по обеспечению электропривода отказоустойчивости .....	23
1.5 Выводы по разделу.....	25
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В АВАРИЙНЫХ И НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ.....	26
2.1. Особенности моделирования электродвигателей переменного тока в аварийных и неполнофазных режимах работы.....	26
2.2 Анализ схем включений математической модели для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме работы трехфазного АД.....	29
2.3 Математическая модель для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме работы мотор-колеса трехфазного АД со схемой включения с развязанными фазами.....	34
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	37
3.1 Постановка задачи.....	37

3.2 Вывод по разделу .....	42
3.3 Отказоустойчивое гибридное транспортное средство с асинхронным электроприводом .....	42
3.3.1 Постановка задача .....	42
3.3.2 Функциональные возможности и работа отказоустойчивое гибридное транспортного средства .....	43
ГЛАВА 4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И РАСЧЕТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ .....	46
4.1 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов.....	46
4.1.1 Расчетные параметры двигателя .....	47
4.1.2 Определение параметров схемы замещения двигателя .....	48
4.1.3 Проверка адекватности расчетных параметров двигателя .....	51
4.2.1 Выбор способа скоростного управления двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).....	52
4.2.2 Структурная схема силового канала ЭП.....	53
4.2.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	54
4.2.4 Выводы по разделу.....	58
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	60
5.1 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта .....	60
5.2 Планирование научно-исследовательских работы.....	62
5.3 Определение трудоемкости работ .....	63
5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	65
5.5 Календарный план.....	66
5.6 Бюджет затрат на разработку проекта .....	68

5.7 Полная заработная плата исполнителей темы .....	68
5.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	70
5.9 Накладные расходы.....	71
5.10 Расчет прочих затрат.....	71
Выводы по 5 главе.....	72
ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	74
6.1 Производственная безопасность .....	75
6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности.....	75
6.1.1.1 Производственные метеоусловия.....	75
6.1.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	77
6.1.1.3 Запыленность .....	79
6.1.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений .....	81
6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды.....	83
6.2.1 Электроопасность.....	83
6.2.2 Экологическая безопасность.....	86
6.2.3 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	86
6.2.4 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	87
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	88
6.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	88
6.3.2 Профилактика пожароопасной ситуации (пожара).....	89
6.3.3 Действия при возникновении пожароопасной ситуации (пожара) .....	89
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	90

6.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. ....	90
6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	92
Заключение .....	112
Список публикаций.....	114
Список литературы .....	116
Приложение 1 .....	123
Приложение 2 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## 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.

Из анализа периодичности аварийных ситуаций следует следующее, что периодичность аварий и катастроф на уникальных объектах измеряется от несколько часов до десятков лет и сопряжены со значительными рисками для общества, окружающей природной среды и инженерным инфраструктурам жизнеобеспечения. При этом прямые и косвенные ущербы от тяжелых аварий и катастроф на стратегически важных объектах могут достигать десятков и сотен миллиардов рублей.

Как следует из рис. 2 и согласно тенденциям нормирования ТС, начиная с 1980 года, произошел переход от категории «надежность» к важнейшим понятиям объектов потенциальной опасности – «безопасности» и «живучести», а с 2010 года к обеспечению «риска» и «защищенности».

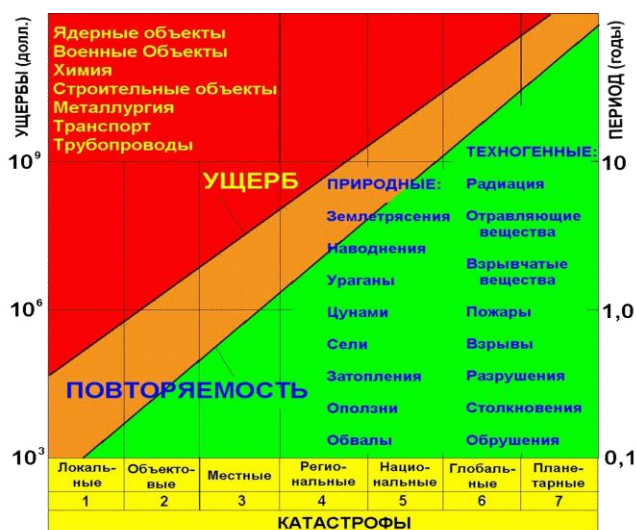


Рисунок 1 – Ущерб и периодичность тяжелых катастроф на уникальных объектах

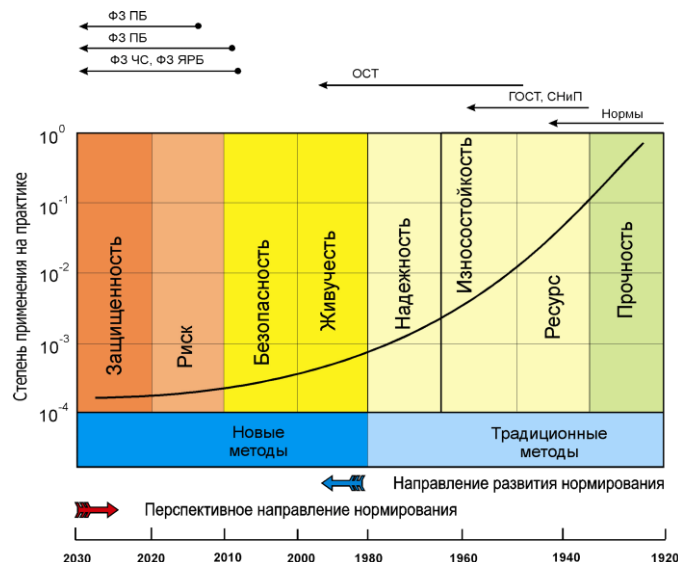


Рисунок 2 – Структура и развитие методов нормирования ТС

Благодаря развитию электродвигатели нашли применение в разных отраслях, например, автомобильная промышленность. Причем электродвигатели способны использоваться либо отдельно, либо совместно с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), что дает возможность оберечься от работы ДВС в режиме не больших нагрузок, а также при повышении топливной эффективности силовой установки, реализовывать рекуперацию кинетической энергии. Не менее распространённый вид гибридов— автомобили, в которых, ДВС совмещен с двигателями, работающими на сжатом воздухе. Нужно отличать от гибридов транспортные средства с электромеханической трансмиссией, такие как тепловозы.

Преимущества:

- Экономная эксплуатация
- Экологическая чистота
- Улучшенные ходовые характеристики
- Увеличение дальности пробега
- Сохранение и повторное использование энергии
- Обычная заправка топливом

Недостатки:

- Высокая сложность

- Утилизация аккумуляторов
- Подогрев салона
- Опасность для пешеходов (из-за своей бесшумности)

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. Одним из основных элементов электромобиля является – электродвигатель, который служит для создания необходимого для движения крутящего момента. В качестве тягового электродвигателя используют трехфазные асинхронные электрические машины переменного тока мощностью от 15 до 200 и более кВт. ДВС электродвигатель имеет высокую эффективность и меньшие потери энергии. КПД электродвигателя составляет 90% против 25% у ДВС.

Основными преимуществами электродвигателя являются:

- реализация максимального крутящего момента во всем диапазоне скоростей;
- возможность работы в двух направлениях без дополнительных устройств;
- простота конструкции, воздушное охлаждение;
- возможность работы в режиме генератора.

Очевидное, что повышение отказоустойчивости неразрывно связано с живучестью электроприводов, обеспечивающих функциональные свойства электромобиля в заданных пределах. Обеспечить свойство живучести возможно на основе технологии построения избыточных систем, используя комбинацию следующих видов резервирования: структурного, функционального, временного, информационного и нагрузочного.



# ГЛАВА 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## 1.1 Постановка задачи

Для определения исследований необходимо произвести обзор схемотехнических решений зарубежных ученых по обеспечению электропривода отказоустойчивости, работа электропривода при двухфазном режиме. Проанализировать уже известные способы отказоустойчивости.

## 1.2 Анализ известных методов обеспечения асинхронного электропривода свойством живучести

Электропривод переменного тока построенный на основе асинхронных двигателей является базой для организации практически всех технических сложных систем поступательного и вращательного принципа воздействия. Существует необходимость обеспечения безопасности и отказоустойчивости электропривода практически во всех промышленных отраслях. Свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказ некоторых компонентов—определяется термином «живучесть». 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 в том случае, когда во время пуска транспортного средства, после не устраненной аварии процесс начала движения транспортного средства не отличается от нормальной эксплуатации, с учетом ограничений по сниженной мощности привода колеса, которая сохраняется в бортовом компьютере и выводится на пульт управления. [6]

Можно выделить три группы неисправностей:

- неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети;
- неисправности механической части электропривода (включая редуктор);

- неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды.

#### 1. Неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети:

- короткое замыкание в обмотках двигателя;
- перегрузка по току;
- обрывы в обмотках двигателя;
- пробой изоляции фазы обмоток на корпус;
- обрыв питания одной из фаз;
- возникновение 1 или 2 фазного режима 3 фазного электродвигателя;
- увеличение потребляемой мощности при постоянной нагрузке на валу электродвигателя;
- несимметрия фаз питающей сети;
- падение скорости вращения вала электродвигателя ниже номинальной (превышен вращающий момент);
- ХХ электродвигателя в случае сброса нагрузки (при поломке пальцев муфты, срезания шпонки или обрыве ремня);
- «опрокидывание» АД или внезапное уменьшение нагрузки;
- Токовая несимметрия, небаланс токов;
- неправильное чередование фаз;
- обрыв одного или нескольких стержней ротора;
- снижение межвитковой и межфазной изоляции (полное или частичное междуфазное замыкание);
- изменения частоты и напряжения питающей сети за допустимые значения;
- не отработки команды на пуск двигателя вследствие неисправности (пропадания) фазы сети;
- чрезмерно большая частота включений;
- затянувшийся пуск;
- отказ полный или частичный магнитного пускателя (отказ отдельных контактов), приводящий к не отработке команды на пуск электродвигателя

или неполнофазному режиму;

- отказ в функционировании микроконтроллера (не прохождение операции самотестирования).

## 2. Неисправности механической части электропривода:

- заклинивание подшипников;
- стопорение ротора; заторможенный ротор;
- включение при заторможенном роторе;
- поломка пальцев муфты, срезание шпонки, обрыв ремня;
- повышенная вибрация;
- износ редуктора (дефекты шестерен);
- износ подшипников;
- износ электромагнитного тормоза;

## 3. Неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды:

- возрастание температуры активных частей двигателя выше допустимой;
- снижение «запаса по нагреву электродвигателя до нуля»;
- температура окружающего воздуха выше допустимой;
- срабатывание датчика влажности расположенного на статоре при попадании воды;
- перегрев подшипников;
- прекращение вентиляции двигателя.

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 3 способов исполнения отказоустойчивого электропривода. [14]

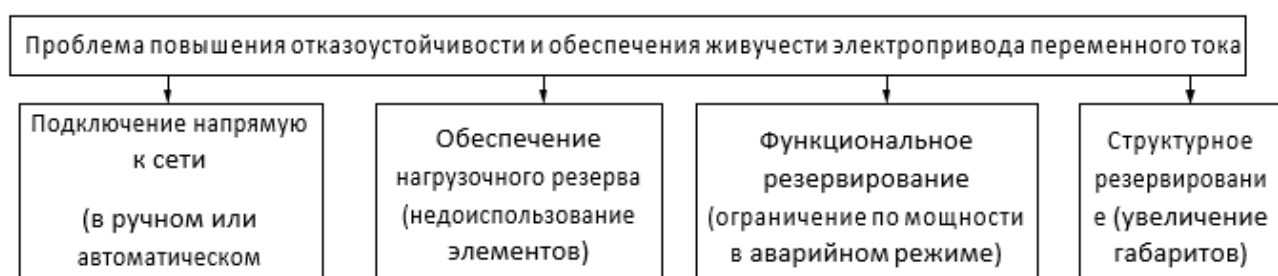


Рисунок 3– Способы обеспечения отказоустойчивости электропривода

### 1.3 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства живучести

1. Живучесть в электроприводе возможна быть обеспечена при рассмотрении трехфазного АД, как система мехатронной с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации, т.е. ев одной из фаз АД может быть переведен в двухфазном режиме работы с возможностью реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

2. Строится асинхронный электропривод на базе управляющего микроконтроллера. Алгоритм реализуется для восстановления работоспособности при проявлении аварийной ситуации (при отказе одной или нескольких фаз) сформированием программных заданий на токи фазные. Микроконтроллерная работа реализовывается с неизменным программным циклом на частоте, которая, не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя.

3. Асинхронный электропривод осуществляется по принципу подчиненного регулирования параметров. В наименьшем составе (моментный двигатель с

параметром регулирования  $I_{\omega}$ ) обязан иметь по току обратные связи. Контур тока, предназначенный для отработки заданного значения, может быть цифровым или аналоговым. Структура регулятора тока обязана обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемого тока. Контур обратной связи по частоте вращения самостоятельно в реализации алгоритма восстановления не участвует.

4. Электропривод асинхронный должен содержать в составе силового преобразователя, преобразовательных ячеек, датчики состояния, они вырабатывают три бита отказа (фазной обмотки двигателя ячейки или силового преобразователя) a, b, c, зачисляющиеся в управляемую систему для отключения отказавшей фазы и для реализации алгоритма восстановления. Опрос, программный датчиков состояния должен осуществляться в каждом микроконтроллерном цикле управления. [14]

Функциональная схема отказоустойчивого гибридного транспортного средства с одним приводом и дифференциальной передачей на два ведущих колеса приведена (в приложении рисунок №1)

Под структурным резервом понимается способ, который, обеспечивает свойства живучести электропривода асинхронного за счет управления микроконтроллерного с реализацией восстановления алгоритма работоспособности на основе элементов в резерве, позволяющий восстановить полностью работоспособность при внезапных отказах преобразователя частоты типа «не выключение ключа» или «не включение ключа» преобразователя частоты.

Уровень, заданный, для живучести в асинхронном трехфазном ЭП возможен достигнут быть при не нарушении следующих достаточных и необходимых условий в случае при обрыве одной из фаз или аварийной ситуации преобразователя частоты:

1. Электропривода живучесть может быть, снабжена за счет структурного резервирования – возможности мониторинга системы и ее восстановление.

2. Строится электропривод на основе 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 [14, 15].

#### 1.4. Обзор схемотехнических решений зарубежных ученых по обеспечению электропривода отказоустойчивости

Ниже перечислено решение по повышению отказоустойчивости асинхронного электропривода предложенных зарубежными учеными.

В первую очередь рассматривается диагностика неисправности и отказоустойчивости.

В Европе обеспечением отказоустойчивости занимаются Ж. ФЕРКОВА (doc., Ing. CSc.) Окончила электрическое инженерное дело в Техническом университете в Кошице в 1982 году и получила CSc в 1994 году. В настоящее время она работает в отделе электротехники и мехатроники, FEEaI TU Košice. Ее профессиональная область электрических машины и их характеристики.

J. KAŇUCH (Ing. PhD.) Окончил электрическое инженерное дело в Техническом университете в Кошице в 1986 году и получил докторскую степень в 2006 году. В настоящее время он работает доцентом кафедры электротехники и мехатроники, FEEaI TU Košice. Его профессиональная область охватывает проектирование электрических машин, их производительность и автомобильная электроника.

Подробнее рассмотрим статью «Двухфазный асинхронный двигатель- моделирование и измерение» (Two-Phase Asynchronous Motor - Simulation and Measurement). В данной работе рассматривается моделирование двухфазного асинхронного двигателя. Основываясь на геометрических размерах, модель была создана в 2D и 3D-программе ANSYS Maxwell. Переходный процесс при запуске двигателя рассчитанный в рамках одной и той же программы. Другая модель была составлена на основе асинхронного двигателя математическое описание в программе MATLAB / Simulink. Волновые формы токов и крутящих моментов двигателя сравниваются. Модели, созданные в MATLAB / Simulink и ANSYS, сравниваются с измерениями. Для измерения использовали симметричный двухфазный источник питания. [11]

Проанализировав работу, можно сказать, что результаты не идентичны: Simulink модель работает с постоянными параметрами, в то время как программы ANSYS

Maxwell 2D и 3D вычислить магнитное поле с помощью конечного элементов. ANSYS Максвелл принимает с учетом нелинейности магнитного материала, потерь в железе, а также влияние намотки. В то время как в вопросе является расчет, влияние конца обмотки рассматривается только через дополнительные индуктивности и сопротивления. Только модель MATLAB / Simulink была по сравнению с результатами измерений. Формы сигнала показывают соответствующее сходство, более высокие сигналы тока вызваны главным образом более высокими гармониками напряжения питания. [11]



## 1.5 Выводы по разделу

1. Произведен обзор и анализ способов обеспечения отказоустойчивости электропривода переменного тока. Перспективным является использование функционального и структурного резервирования.
2. Определено, что для построения отказоустойчивого асинхронного электропривода требуется обеспечить непрерывную мониторинг элементов преобразователя частоты и обмотки статора двигателя, организовать систему управления, позволяющую использовать функциональный или структурный резерв. К таким системам управления можно отнести разработанные системы векторного [16] и частотно-токового [17, 18, 19] управления.
3. Произведен обзор зарубежных исследований в области отказоустойчивости, что подтверждает актуальность исследований по данной тематике. [11]

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В АВАРИЙНЫХ И НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

### 2.1. Особенности моделирования электродвигателей переменного тока в аварийных и неполнофазных режимах работы

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

$$X = X(A_M, [M_0], A_v, s_r, z, T_{\Pi}, M_1, M_2, \Delta M, \Delta \omega). \quad (2.1)$$

Далее рассматриваются новые математические и имитационные модели ЭПТ, которые позволяют решить следующие задачи:

- исследовать алгоритмы  $A_M$  мониторинга текущего состояния электропривода в реальном времени с формированием матрицы  $[M_0]$  отказов;
- реализовать алгоритмы  $A_v$  отказоустойчивого управления с учетом битов  $a, b, c$ , матрицы  $[M_0]$  отказов;
- включить в алгоритм управления избыточный ресурс ПЧ и двигателя при изменении количества  $s_r \geq 2$  фаз двигателя (в т.ч. однофазный режим работы АД,  $s_r = 1$ );
- задавать длительность  $T_{\Pi}$  переключения структуры ЭП при восстановлении его работоспособности;
- формировать тип магнитного поля в зазоре ЭМ: пульсирующее, эллиптическое и круговое, учитывать воздействие прямой (момент  $M_1$ ) и обратной (момент  $M_2$ ) последовательности поля;
- выбирать схемы подключения: со связанными ( $z = 1$ ) и развязанными ( $z = 0$ ) фазами двигателя;
- определять показатели функционирования ЭПТ для переходных и установившихся процессов: пульсации  $\Delta \omega$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta I$ ,  $\Delta M_s$ ,  $\Delta \omega_s$  после полного или частичного восстановления работоспособности.

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

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

Алгоритм  $A_v$  восстановления работоспособности ЭПТ формируется как задание на фазные токи статора в виде выражений самоорганизации управления с интегрированными битами матрицы отказов:

$$A_v = \left\{ \begin{array}{l} I_A(a, b, c, d, I_\omega, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_k) \\ I_B(a, b, cd, I_\omega, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_k) \\ I_C(a, b, cd, I_\omega, k_d, k_o, \xi, (2\pi/3 - \xi), \alpha, \theta, \psi_A, \alpha_k) \end{array} \right\}. \quad (2.2)$$

Для задания отказа типа «обрыв фазы статора» в исходные выражения для уравнений полей прямой и обратной последовательности введена матрица  $[M_0]$  отказов, позволяющая формировать аварийный двухфазный режим работы. Отказ типа «обрыв фазы статора» осуществляется путем приравнивания бита  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$  отказа соответствующей фазы, единице.

В аварийном двухфазном режиме работы трехфазного ЭПТ присутствует эллиптическое магнитное поле в воздушном зазоре, которое может быть представлено результатом воздействия полей прямой и обратной последовательности, используя метод симметричных составляющих. Широко известная обобщенная модель электрической машины учитывает лишь поле прямой последовательности. Существует два варианта представления модели двигателя переменного тока, работающего с эллиптическим полем – модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и двумя роторами,

модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и одним ротором [20].

В нашем случае, при формировании математической модели целесообразно использовать модель АД с двумя статорами и роторами (рис. 4). 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 эти напряжения зависят от скольжения АД [21].

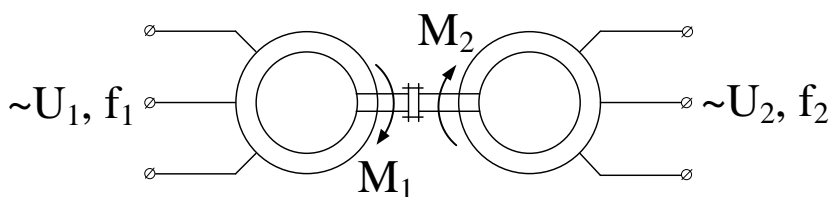


Рисунок 4 – Схема электрической машины с двумя статорами и двумя роторами

При составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов использованы общепринятые допущения и ограничения: фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол  $2\pi/3$  радиан; реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, а её намагничивающая сила равна намагничивающей силе реальной обмотки; магнитная цепь электрической машины ненасыщена; воздушный зазор равномерен и симметричен; энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре; конструкция ротора является симметричной; потери в стали и механические потери пренебрежимо малы; напряжения фаз синусоидальны; питающая сеть, ключи и диоды преобразователя частоты – идеальны.

## 2.2 Анализ схем включений математической модели для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме работы трехфазного АД

Для анализа процессов в АД часто применяются математические модели, представленные в двухфазной системе координат, что позволяет исследовать, в том числе, и несимметричные режимы работы [20,21,60,61]. Однако при наличии несинусоидальных питающих напряжений такое представление неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин отличаются друг от друга [20].

В связи с этим предложена универсальная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать динамические и статические режимы при различных видах несимметрии и аварийном отключении фазы как для схемы подключения с развязанными фазами (с независимым протеканием тока в каждой фазной обмотке), так и со связанными фазами двигателя.

В случае моделирования АД и записи уравнений в естественной трехфазной системе координат взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора являются периодическими коэффициентами и изменяются по гармоническому закону при вращении ротора машины.

Поэтому уравнения АД целесообразно описать в заторможенной системе координат  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ , которая неподвижна относительно статорных осей, и перейти от периодических коэффициентов к постоянным значениям [20].

Процессы, протекающие в электродвигателе при обрыве фазы статора, зависят от схемы соединения средней точки источника питания и нейтрали обмотки статора. Так, при выполнении двигателя по схеме со связанными фазами (рис. 5, б) в случае наступления аварийной ситуации, две оставшиеся фазы оказываются соединенными последовательно и подключенными на

линейное напряжение, по ним протекает один и тот же ток, а в отключенной обмотке ток отсутствует [63].

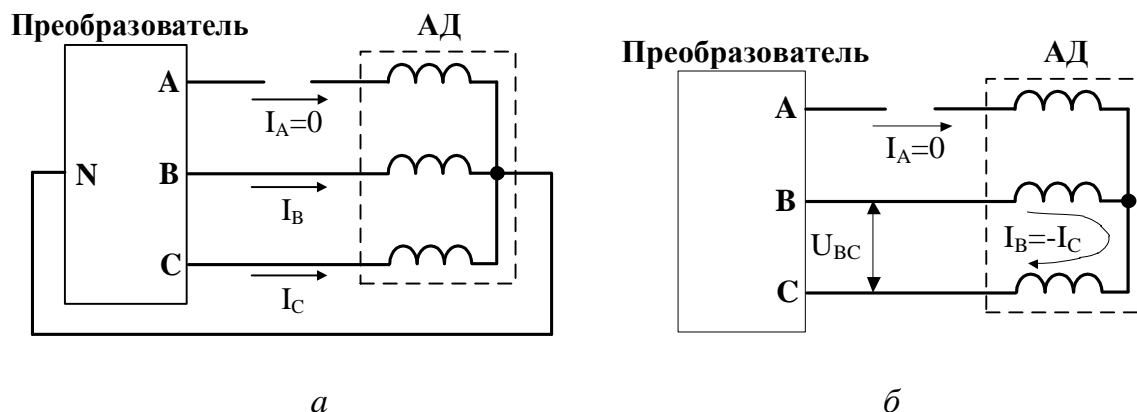


Рисунок 5 – Протекание тока в обмотках двигателя после обрыва фазы "А" для схем подключения фаз: с развязанными– а, со связанными – б

Рассмотрим математическую модель трехфазного АД при описании переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме для схемы включения с развязанными фазами двигателя (рис. 5, а).

В этом случае уравнения электромагнитного равновесия обобщенной электрической машины, имеющей два статора и один ротор для поля прямой последовательности, записываются следующим образом [20]:

$$\begin{aligned}
 U_{1A} &= R_s \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt}; \\
 U_{1B} &= R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_{1B}}{dt}; \\
 U_{1C} &= R_s \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_{1C}}{dt}; \\
 0 &= R_r \cdot i_{1a} + \frac{d\Psi_{1a}}{dt} + (\Psi_{1b} - \Psi_{1c})p\omega/\sqrt{3}; \\
 0 &= R_r \cdot i_{1b} + \frac{d\Psi_{1b}}{dt} + (\Psi_{1c} - \Psi_{1a})p\omega/\sqrt{3}; \\
 0 &= R_r \cdot i_{1c} + \frac{d\Psi_{1c}}{dt} + (\Psi_{1a} - \Psi_{1b})p\omega/\sqrt{3}.
 \end{aligned}$$

Потокосцепления для всех фаз поля прямой последовательности определяются уравнениями:

$$\begin{aligned}\Psi_{1A} &= L_S i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\ \Psi_{1B} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_S i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\ \Psi_{1C} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_S i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_m i_{1c}; \\ \Psi_{1a} &= L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_R i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\ \Psi_{1b} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_R i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\ \Psi_{1c} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_R i_{1c}.\end{aligned}$$

Уравнения равновесия для магнитного поля обратной последовательности:

$$\begin{aligned}U_{2A} &= R_S \cdot i_{2A} + \frac{d\Psi_{2A}}{dt}; \\ U_{2B} &= R_S \cdot i_{2B} + \frac{d\Psi_{2B}}{dt}; \\ U_{2C} &= R_S \cdot i_{2C} + \frac{d\Psi_{2C}}{dt}. \\ 0 &= R_r \cdot i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt} + (\Psi_{2b} - \Psi_{2c})p\omega/\sqrt{3}; \\ 0 &= R_r \cdot i_{2b} + \frac{d\Psi_{2b}}{dt} + (\Psi_{2c} - \Psi_{2a})p\omega/\sqrt{3}; \\ 0 &= R_r \cdot i_{2c} + \frac{d\Psi_{2c}}{dt} + (\Psi_{2a} - \Psi_{2b})p\omega/\sqrt{3}.\end{aligned}$$

Потокосцепление для всех фаз магнитного поля обратной последовательности имеет вид:

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

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

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

В результате, математическую модель трехфазного АД с вращающимися магнитными полями прямой последовательности можно записать матричными уравнениями в нормальной форме Коши:

$$\frac{d}{dt} [i_1] = [L_1]^{-1} \cdot \{ [U_1] - \langle [R] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_1] \}; \quad (2.3)$$

Математическую модель трехфазного двигателя с вращающимися магнитными полями обратной последовательности можно представить в виде:

$$\frac{d}{dt} [i_2] = [L_1]^{-1} \cdot \{ [U_2] - \langle [R] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_2] \}, \quad (2.4)$$

где  $[i_1], [i_2]$  – матрицы неизвестных фазных токов (токи статора и ротора прямой и обратной последовательностей соответственно);  $[U_1], [U_2]$  – фазные матрицы напряжений прямой и обратной последовательностей;  $[R]$  – матрица сопротивлений;  $[L_1], [L_2]$  – фазные матрицы индуктивностей;  $[L_1]^{-1}$  – обратная матрица  $[L_1]$ ;  $L_S, L_R$  – индуктивности статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность:

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

$$\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$



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

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

Следует отметить, что при работе в трехфазном режиме АД магнитные поля обратной последовательности в воздушном зазоре отсутствуют, и соответствующие уравнения в моделях не участвуют.

Для задания отказа одной из фаз статора необходимо в исходные выражения для уравнений поля прямой последовательности и обратной последовательности ввести матрицу  $[M_0]$  отказов, позволяющую переходить в аварийный двухфазный режим работы:

$$[M_0] = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

При этом нулевому состоянию битов  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  отказов фаз АД будет соответствовать номинальный трехфазный режим работы, а единичному – обрыв соответствующей фазы обмотки статора. Тогда выражение для матрицы активных сопротивлений примет следующий вид:

$$[R_M] = ([1] + k_\infty[M_O]) \cdot [R]; \quad (2.6)$$

где  $k_\infty$  – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора АД;  $[1]$  – единичная матрица соответствующей размерности.

Электромагнитные моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые магнитными полями прямой (индекс 1) и обратной (индекс 2) последовательности, определяются согласно уравнениям:

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

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

Уравнение движения электропривода, учитывающее момент сопротивления  $M_c$ , электромагнитные моменты  $M_1$  и  $M_2$  имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 - M_c). \quad (2.7)$$

где:  $M_1, M_2$  – электромагнитные моменты магнитных полей прямой и обратной последовательности;  $M_c$  – момент сопротивления механической нагрузки двигателя;  $J$  – суммарный момент инерции электропривода;  $p$  – число пар полюсов.

### **2.3 Математическая модель для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме работы мотор-колеса трехфазного АД со схемой включения с развязанными фазами**

Ниже рассматривается модель отказоустойчивого асинхронного электропривода для гибридного транспортного средства. При описании переходных процессов были приняты допущения: сопротивление воздуха, сила движения на подъем, коэффициент сцепления, расход топлива и энергии и износ шин не учитывались.

Момент сопротивления рассчитан как:

$$M_c = \frac{F_m + F_b + F_g}{d_k};$$

Где  $F_m$  – сила сопротивления формируется,

$F_b$  – сила сопротивления;

$F_g$  – сила сопротивления дорожного покрытия;

$d_k$  – диаметр колеса.

Переход от угловой скорости к линейной осуществляется следующим способом:

Модуль линейной скорости можно найти так:  $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \omega$  или

$$v = \omega \cdot R.$$

Отсюда видно, что, чем дальше расположена точка тела от оси вращения, тем больше ее линейная скорость.

Модуль ускорения точки, движущейся равномерно по окружности, можно выразить через угловую скорость тела и радиус окружности:  $a = \frac{v^2}{R}$ , но  $v = \omega R$ .

Следовательно,  $a = \omega^2 R$ .

Момент инерции колеса  $I_2$  посчитан как:

$$I_z = J + (m_{\text{маш}} + m_{\text{кол}}) \cdot (R_k^2),$$

Где  $m_{\text{маш}}$  – масса транспортного средства;

$m_k$  – масса колеса;

$R_k$  – радиус колеса (рассчитывается от оси вращения).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} [i_1] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \langle [R_M] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_1] \right\}; \\ \frac{d}{dt} [i_2] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \langle [R_M] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_2] \right\}; \\ T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\ M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{c1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{c1} i_{a1})]; \\ M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{c2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{c2} i_{a2})]; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{(M_1 - M_2 \pm M_c)}{Iz}; \end{array} \right. \quad (2.8)$$

где  $T_{\Pi}$  – длительность переключения структуры ЭП;  $t_1$  – момент времени выявленного отказа;  $t_2$  – момент времени восстановления кругового вращающегося поля;  $v$  – линейная скорость;  $M_1, M_2$  – электромагнитные моменты магнитных полей прямой и обратной последовательности.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 3.1 Постановка задачи

Разработать модель отказоустойчивого асинхронного электропривода для гибридного автомобиля с обеспечением 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 при использовании ключей, что и позволит увеличить мощность на 30% без потерь.

Разработка отказоустойчивого асинхронного электропривода со свойством живучести обуславливает необходимость изучения и анализа аварийных режимов работы. Для выполнения таких исследований необходимо разработать математическую модель процессов, проходящие в электродвигателе асинхронном в случае обрыве фаз, т.е. возникновения аварийной ситуации.

Описание математических процессов электромеханического преобразования энергии в машинах асинхронных отличается известной сложностью. В составлении дифференциальных уравнений переходных процессов машин асинхронных является одним из важнейших этапов подготовки задачи.

Ниже разработана модель отказоустойчивого асинхронного электропривода со свойством живучести, для гибридного транспортного средства, при моделировании приняты допущения: сопротивление воздуха, сила движения на подъем, коэффициент сцепления, расход топлива и энергии и износ шин, инерционность масс не учитывались, так же нагрузка бралась на одно колесо.

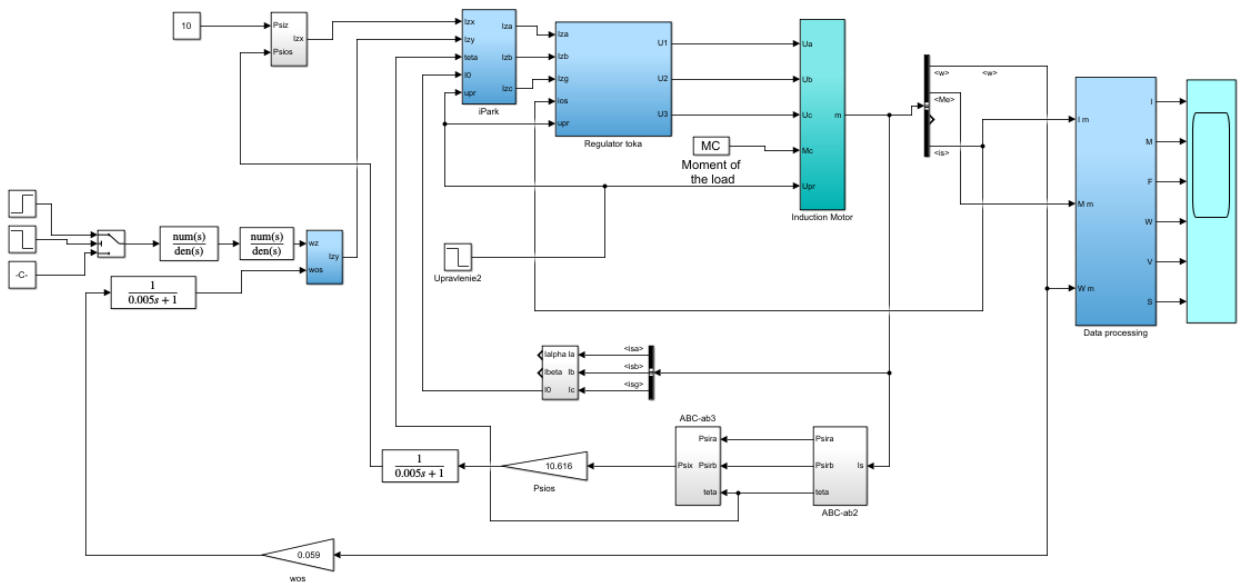


Рисунок 6 – Имитационная модель в среде MATLAB

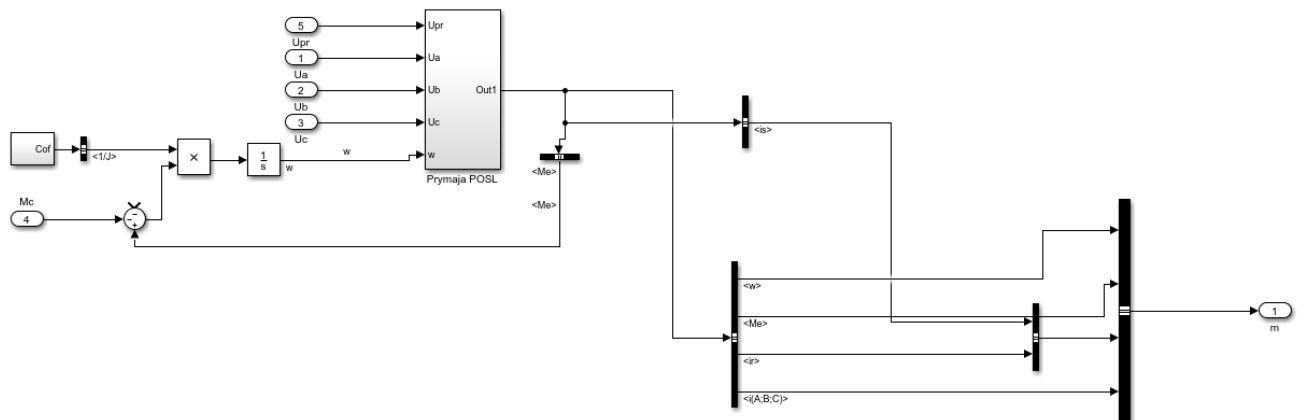


Рисунок 7 – Блок управления асинхронного двигателя

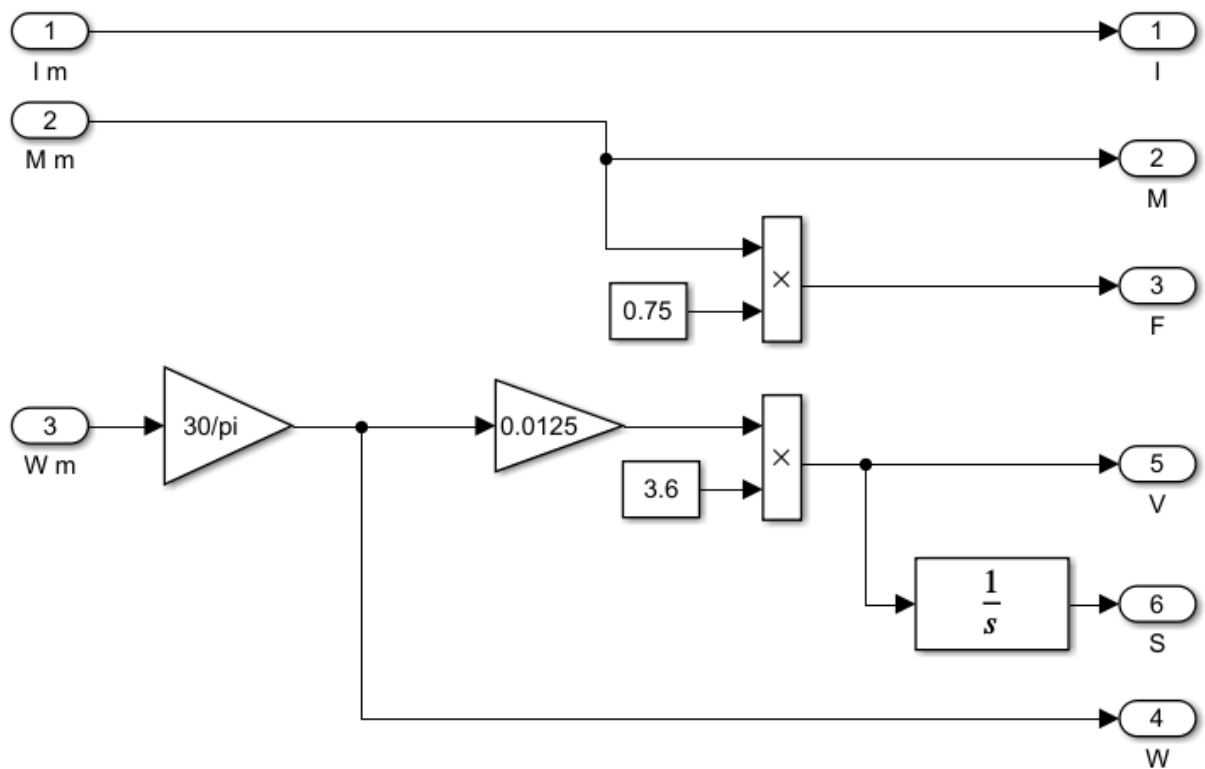


Рисунок 8 – Блок моделирования транспортного средства

На основе разработанной имитационной модели и синтезированной ранее системы векторного управления произведем моделирование аварийной ситуации, типа обрыв фазы среде Matlab Simulink. На рисунке 9 представлены переходные процессы по скорости, току и моменту, протекающие в электродвигателе при 3-х фазном режиме работы.

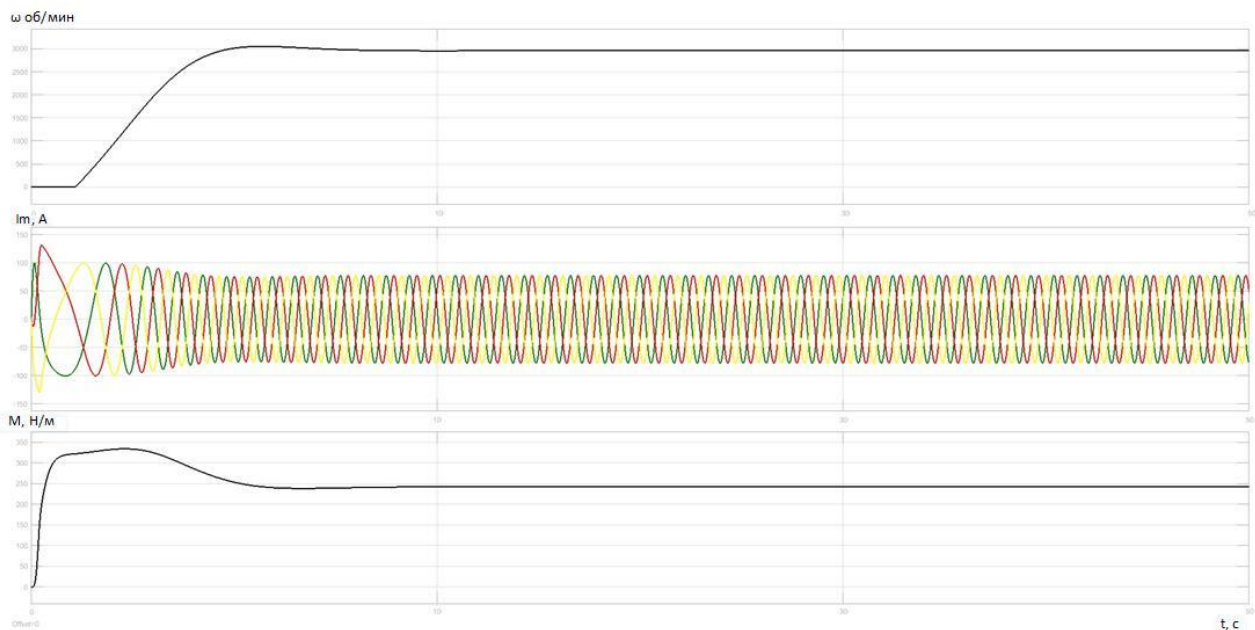


Рисунок 9 – Переходный процесс 3-фазного режима работы АД

На рисунке 10 представлены переходные процессы по току, моменту, силе, частота вращения, скорости и перемещения. Их приведенных переходных процессов видно, что в случае возникновения аварийной ситуации происходит увеличение токов, протекающих по обмотке статора, и при этом электромагнитный момент приближен к нулю. Скорость уменьшается.

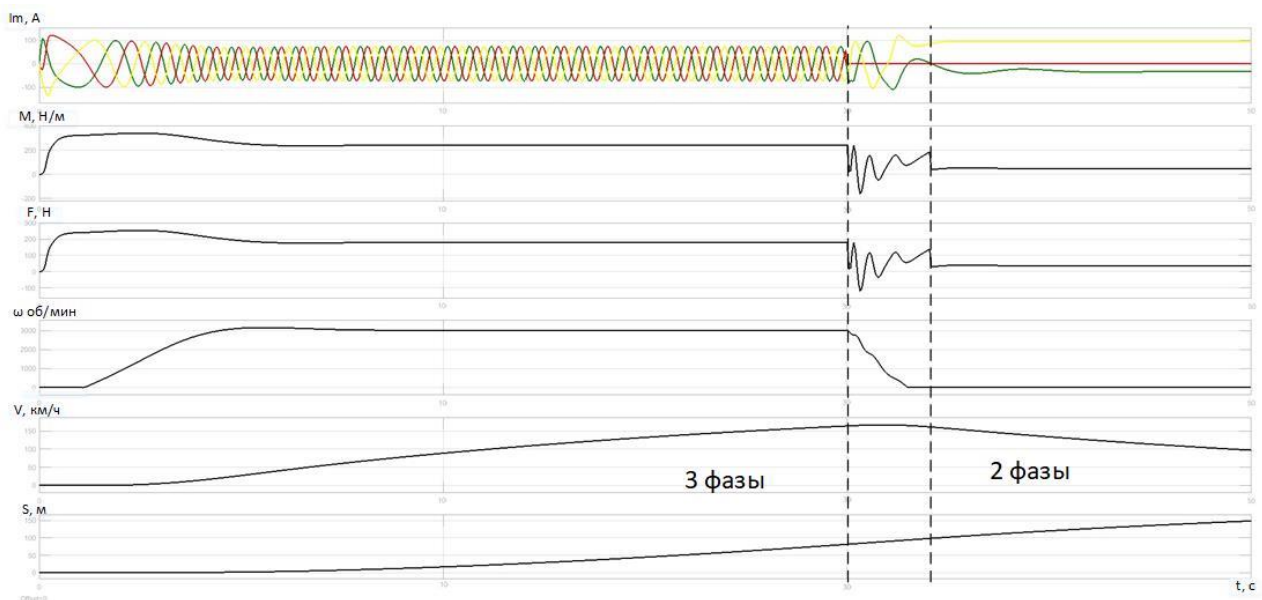


Рисунок 10 – Переходный процесс при обрыве одной фазы

На рисунке 11 так же представлены переходные процессы по току, моменту, силе, частота вращения, скорости и перемещения. В данную характеристику



заложенная максимальная нагрузка, т.е. учитывалась масса транспортного средства, оборудования, 4 пассажира в салоне транспортного средства.

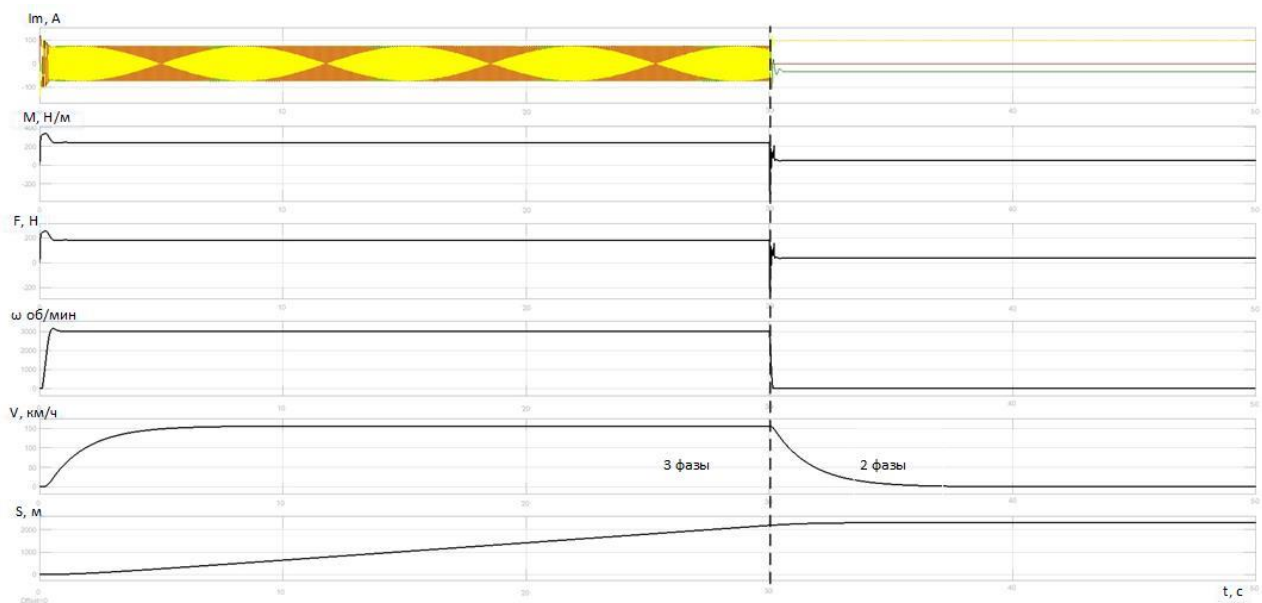


Рисунок 11 – Переходный процесс при максимальной нагрузке

На рисунке 12 изображена характеристика, в которой заложена минимальная нагрузка, т.е. не учитывались пассажиры в салоне транспортного средства.

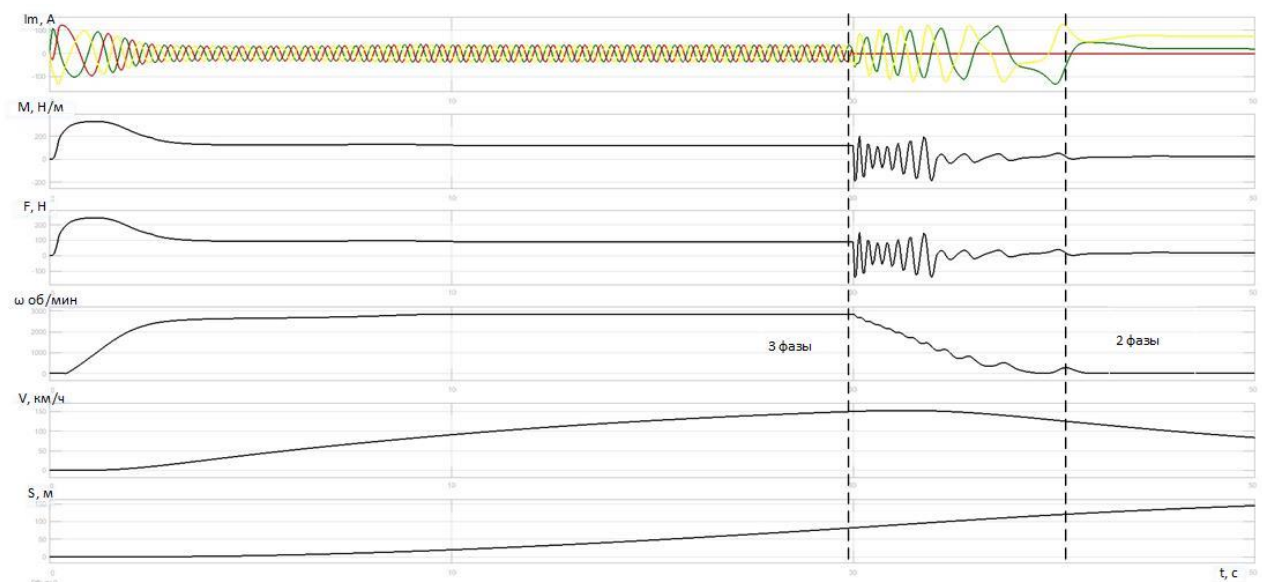


Рисунок 12 – Переходный процесс при минимальной нагрузке

На рисунке 13 переходный процесс именно аварийного режима работы, с учетом того, что, если попробовать запустить транспортное средство в 2-х фазном

режиме работы, по результатам моделирования видно, что это не предоставляется ВОЗМОЖНЫМ.

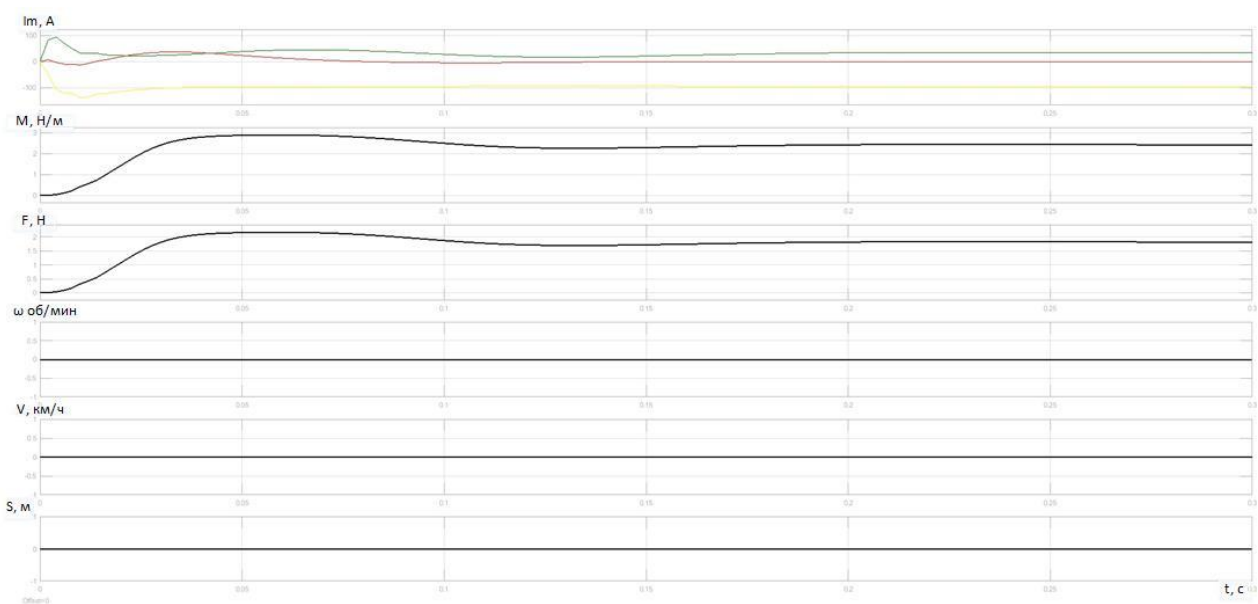


Рисунок 13 – Попытка запуска АД на 2х фазах

### 3.2 Вывод по разделу

Увеличение амплитуды тока обусловлено необходимостью компенсации мощности, ведь поле в зазоре электрической машины будет эллиптическим. Активная мощность двигателя упадет на 33% и эллиптическое поле не обеспечит равномерности вращения двигателя, но будет обеспечена ограниченная функциональность с формированием свойства живучести привода колеса. При соответствующем снижении на 33% мощности в соседнем приводе колеса управляемость транспортного средства будет восстановлена.

### 3.3 Отказоустойчивое гибридное транспортное средство с асинхронным электроприводом

#### 3.3.1 Постановка задача

Разработка обеспечения живучести гибридного автомобиля при обрыве обмотки статора в одном из двигателей или отказе ключа в преобразователе частоты соответствующего колеса.

Транспортное средство содержит  $m$ -приводов колес, где  $m \geq 2$ , а нулевые провода асинхронных двигателей подключены с выходным напряжением бортового источника электрической энергии.

### **3.3.2 Функциональные возможности и работа отказоустойчивое гибридное транспортного средства**

Функциональные возможности генератора достигаются следующим образом:

Асинхронный трехфазный двигатель подключен к преобразователю частоты выполненному по мостовой схеме на шести ключах и подключенному по цепям питания к накопителю электрической энергии. В этом случае в рабочем трехфазном режиме создается круговое вращающееся поле и в обмотках двигателя протекают трехфазные токи с фазовым сдвигом  $2\pi/3$ . При обрыве обмотки статора в приводном двигателе или отказе одного из ключа в преобразователе частоты приводного двигателя круговое вращающееся поле рабочего двигателя, после аварии становится пульсирующим с нулевым вращающим моментом, так как процесс формирования трехфазных токов зависит от протекающего тока в соседней фазе двигателя. В двух работоспособных фазах, токи будут иметь весьма похожую амплитуды с фазовым сдвигом  $\pi$ . При подключении нулевого провода асинхронных двигателей выходным напряжениям бортового источника электрической энергии в трехфазном рабочем режиме, также будут формироваться трехфазные токи, но протекание токов в каждой фазе теперь не будет зависеть от соседней фазы, а значит при потере работоспособности одной из фаз в двух оставшихся фазах будут формироваться двухфазные токи с фазовым сдвигом  $2\pi/3$ . Поле в зазоре электрической машины будет эллиптическим. Активная мощность двигателя упадет на 33% и эллиптическое поле не обеспечит равномерности вращения двигателя, но будет обеспечена ограниченная функциональность с формированием свойства живучести привода колеса. При соответствующем снижении на 33% мощности в соседнем приводе колеса

управляемость транспортного средства будет восстановлена. Функциональная схема в приложение № 3.

Работает отказоустойчивое гибридное транспортное средство следующим образом:

Водитель транспортного средства с пульта 9 (ПУ) съемным ключом зажигания подает на бортовой компьютер 9 (ПУ), сигнал включения бортового источника 1 (ИЭЭ) электропитания гибридного транспортного средства. Режим движения. При этом бортовой компьютер 9 (ПУ) подает управляющий сигнал на преобразователь 3 (ПЭЭ) для его подключения к силовым аккумуляторам накопителя 2 (НЭЭ) и преобразования постоянного напряжения указанных аккумуляторов в переменное трехфазное напряжение. Далее водитель включает направление движения транспортного средства рычагом «вперед-назад». При этом бортовой компьютер 9 (ПУ) выдает сигнал на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) для переключения статорных обмоток двигателей 5 в выбранное направление вращения привода колес 4. Затем водитель педалью скорости движения транспортного средства задает через бортовой компьютер 9 (ПУ) на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) частоту трехфазного напряжения, пропорциональную скорости вращения привода колес 4. При этом трехфазное напряжение заданной частоты электронного преобразователя 3 (ПЭЭ) подается одновременно на статорные обмотки двигателей 5, передних и/или задних колес 4 в зависимости от выбранного водителем режима движения исходя из качества дороги и скоростных ограничений. Нажатие водителем на педаль тормоза обеспечивает выдачу бортовым компьютером 9 команд на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) для переключения обмоток статора двигателей 5 на обратное движение и для изменения частоты напряжения, пропорциональной силе нажатия на педаль тормоза. При этом двигатели 5 переходят на режим генерации электроэнергии, а именно преобразования при торможении колес энергии инерции транспортного средства в электрическую энергию.

При возникновении аварии: обрыве одной из фазы обмотки статора двигателя 5 происходит падение мощности, падает скорость движения. По управляющему входу 7 в бортовой компьютер 8 (БК) поступает информация о снижении потребления тока электронным преобразователем 3 (ПЭЭ) и на пульте управления 9 (ПУ) появляется информация об аварии и о доступном остаточном ресурсе по мощности приводного двигателя 5. Скорость движения уменьшается. В случае пуска транспортного средства после не устраненной аварии процесс начала движения транспортного средства не отличается от нормальной эксплуатации, с учетом ограничений по сниженной мощности привода колеса 4, которая сохраняется в бортовом компьютере 9(ПУ) и выводится на пульт управления 9 (ПУ). В схему заложена решение проблемы по отказоустойчивости асинхронного электропривода. (Приложение №1)

## ГЛАВА 4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И РАСЧЕТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

### 4.1 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов

1. Электродвигатель выбираем общепромышленного назначения серии АИР

2. Скорость, номинальная, электродвигателя выбирается исходя из условия  $\omega_{\text{двном}} < \omega_{\text{ЭПМАКС}}$ , что требует регулирования у двигателя скорости в первой зоне с постоянным потоком двигателя ( $f_{\text{и}} \leq 50$  Гц).

3. Мощность электродвигателя избирается в соответствии с зависимостями длительно кратковременно и допустимого, момента и допустимого тока или двигательной мощности в функции скорости.

Мощность номинальная электродвигателя, выбирается в длительной работы режиме в соответствии со следующим условием:  $P_{\text{двном}} \geq P_{\text{двпотр}}$

Требуемая мощность двигателя в зоне длительной работы с постоянным потоком:  $\omega \leq \omega_{\text{дв.н}}$

$$P_{\text{мп}} = g \cdot F_{\text{тр}} \cdot m \cdot V \cdot C_x \cdot S \cdot V^2 + g \cdot m \cdot \sin \alpha = \\ = 9.8 \cdot 0.092 \cdot 1525 \cdot 45 + 2 \cdot 2.1 \cdot (45)^2 + 9.8 \cdot 1525 \cdot \sin 20 = 75,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$F_{\text{тр}}$  – трение качения по асфальту;

$m$  – полная масса транспортного средства;

$V$  – скорость движения, максимальная;

$C_x$  – коэффициент обтекаемости;

$S$  – лобовая площадь кузова;

$\alpha$  – угол наклона дорожного полотна.

Был выбран двигатель серии АИР250S2 с мощностью  $P_{\text{дв.н}} = 75$  кВт.

Паспортные данные приводного электродвигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Паспортные данные электродвигателя

Типоразмер	$n_0, \left[ \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	$U_{\text{ИН}}, [\text{В}]$	$P_{\text{ДВ.Н}}, [\text{кВт}]$	При номинальной нагрузки			$J_{\text{ДВ}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$
				$s_{\text{Н}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{Н}}$	$\eta_{\text{Н}}, \%$	
АИР250S2	3000	380	75	2	0,9	93	0,35

Продолжение таблицы 1

$m_{\text{П}} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{К}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{Н}}}$	Степень защиты	$s_{\text{К}}, \%$
1,8	3	IP44	43

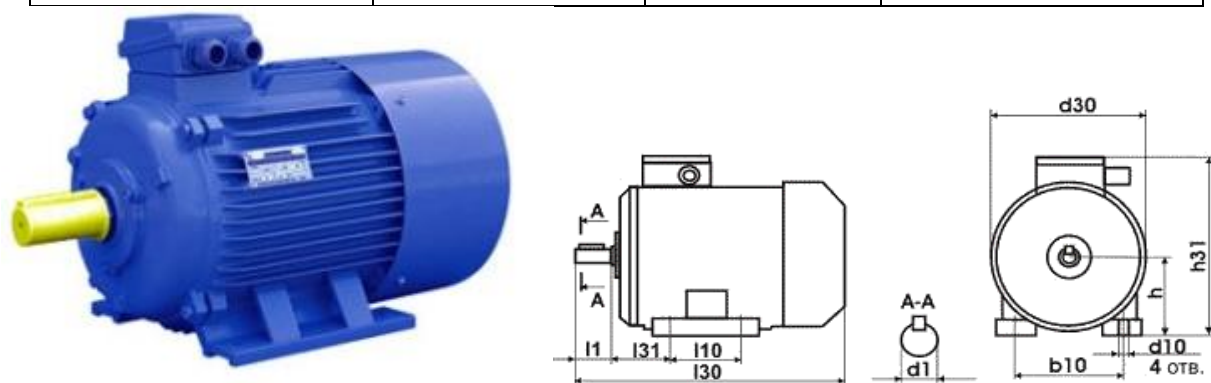


Рисунок 14 – электродвигатель АИР250S2 на напряжение 380

#### 4.1.1 Расчетные параметры двигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000}{30} = 314.159 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

Номинальная скорость вращения двигателя:

$$n_{\text{ДВ.Н}} = (1 - s_{\text{Н}}) \cdot n_0 = (1 - 0.02) \cdot 3000 = 2940 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{n_{\text{дв.н}}}{9.55} = \frac{2940}{9.55} = 307.87 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{75 \cdot 10^3}{307.87} = 243.66 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора. Для определения номинального фазного тока необходимо знать схему соединения обмоток статора. Соединение обмоток неизвестно, принимаем соединение Y.

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{75 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.93} = 135.76 \text{ А}$$

Примечание:  $I_{1\text{лн}}$  – ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы.

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_k = m_k \cdot M_{\text{дв.н}} = 3 \cdot 243.60 = 730.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 1.8 \cdot 243.60 = 438.48 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

#### 4.1.2 Определение параметров схемы замещения двигателя

Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является T-образная схема замещения, представленная на рисунке 15 [2].



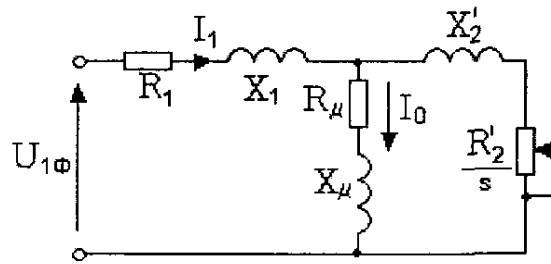


Рисунок 15 – Схема замещения асинхронного двигателя

Ток фазы статора при частичной нагрузке:

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\phi\text{н}} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{0.75 \cdot 75000}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.93} = 114.368 \text{ А},$$

где  $\cos \varphi_{p^*} = 0.9$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке [2];

$\eta_{p^*} = 0.93$  – КПД при частичной нагрузке [2, стр. 71];

$p^* = 0.75$  – коэффициент загрузки двигателя [2].

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \left[ \frac{p^* \cdot (1 - s_{\text{н}})}{(1 - p^* \cdot s_{\text{н}})} \cdot I_{1\text{н}} \right]^2}{1 - \left[ \frac{p^* \cdot (1 - s_{\text{н}})}{(1 - p^* \cdot s_{\text{н}})} \right]^2}} = \sqrt{\frac{114.36^2 - \left[ \frac{0.75 \cdot (1 - 0.02)}{(1 - 0.75 \cdot 0.02)} \cdot 135.76 \right]^2}{1 - \left[ \frac{0.75 \cdot (1 - 0.02)}{(1 - 0.75 \cdot 0.02)} \right]^2}} = 79.723 \text{ А}$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения:

$$s_{\text{к}} = s_{\text{н}} \cdot \frac{m_{\text{к}} + \sqrt{(m_{\text{к}})^2 \cdot [1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_{\text{к}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_{\text{к}} - 1)},$$

$$= 0.0167 \cdot \frac{3 + \sqrt{3^2 \cdot [1 - 2 \cdot 0.02 \cdot 1.5 \cdot (3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.02 \cdot 1.55 \cdot (3 - 1)} = 0.134$$

где  $\beta$  – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, принимаем  $\beta = 1.55$ .

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_{\text{н}})}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{дв.н}} \cdot C_1^2 \cdot \left( \beta + \frac{1}{s_{\text{к}}} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.02)}{2 \cdot 3 \cdot 75000 \cdot 1.039^2 \cdot \left( 1.55 + \frac{1}{0.081} \right)} = 0.032 \text{ Ом},$$

где  $C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_{i\text{дв}} \cdot I_{1\text{дв}}} = 1 + \frac{79.723}{2 \cdot 7.5 \cdot 135.766} = 1.039$  – коэффициент,

характеризующий соотношение  $\frac{X_{\mu} + X_{1\delta}}{X_{\mu}}$ ;

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.039 \cdot 0.032 \cdot 1.55 = 0.052 \text{ Ом}.$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{\text{кн}}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_{\text{к}}^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0.043^2) - 1.55^2} = 7.32,$$

тогда, индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 7.32 \cdot 1.039 \cdot 0.032 = 0.247 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора :

$$X_{1\delta} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 0.247 = 0.104 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0.104}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0003297 \text{ Гн.}$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме:

$$X'_{2\delta} = 0.58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{0.104}{1.039} = 0.138 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_{2\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0.138}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0,000438 \text{ Гн}$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_1$ , наведённая потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - X_{1\delta} \cdot I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.9 - 0.052 \cdot 135,766)^2 + (220 \cdot 0.475 - 0.104 \cdot 135,766)^2} = 207.713 \text{ В,} \end{aligned}$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{207.34}{79.723} = 2.605 \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2.605}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.00829 \text{ Гн.}$$

#### 4.1.3 Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{эм.н}}$  и  $M_{\text{эм.н}}^*$ :

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.052}{314.159 \cdot 0.02 \cdot \left[ (0.392)^2 + \left( 0.052 + \frac{0.032}{0.02} \right)^2 + \left( \frac{0.052 \cdot 0.032}{0.02 \cdot 2.605} \right)^2 \right]} = 261.935 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{(L_{\mu} + L'_{2\delta})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{0.00829}{(0.00829 + 0.000438)} \cdot 0.935 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{135.76^2 - 79.723^2} = 207.037 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где  $\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = \sqrt{2} \cdot 79.723 \cdot 0.00829 = 0.935 \text{ Вб}$ .

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{эм.н}}^* \approx M_{\text{эм.н}} \equiv 261.935 \approx 207.037$$

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}} \leq 1.1 \cdot M_{\text{дв.н}} \equiv 243.605 < 261.935 < 267.96$$

По результатам расчета условия выполняются сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1$ , Ом	$X_{1\delta}$ , Ом	$L_{1\delta}$ , Гн	$X_{\mu}$ , Ом	$L_{\mu}$ , Гн	$R_2'$ , Ом	$X'_{2\delta}$ , Ом	$L'_{2\delta}$ , Гн	$X_{\text{кн}}$ , Ом
0,052	0,104	0,000329	2,605	0,008293	0,032	0,138	0,000438	0,247

#### 4.2.1 Выбор способа скоростного управления двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД)

Важнейшие способы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом и показатели их приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Способы управления в системе ПЧ-АД и их показатели

Способ управления	Диапазон регулирования скорости

<p><b>Скалярное управление, закон управления <math>U_1 / f_1 = const</math> :</b></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 style="text-align: center;">менее 10</p> <p style="text-align: center;">10</p> <p style="text-align: center;">более 10</p> <p style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">100–120</p> <p style="text-align: center;">1000</p>

Принимаем способ управления – векторное управление с датчиком скорости, диапазон регулирования 20. Использование векторного управления позволяет повысить энергетические показатели электропривода, а также обеспечить работоспособность в случае возникновения аварийной ситуации.

#### 4.2.2 Структурная схема силового канала ЭП

В электропривод силового канала входят:

- преобразователь частоты, реализовывающий функцию преобразователя электрического;
- электродвигатель, который осуществляет функцию преобразователя электромеханического;
- механическая система, которая исполняет функцию преобразователя механического.

При разрешении задач синтеза и анализа регулируемых электроприводов асинхронных часто используются модели электродвигателя,

составленные на основе электрической обобщенной машины и выполненные двухфазной вращающейся системе координат (x, y) или в неподвижной.

### 4.2.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя выполним по следующим выражениям:

Значение максимальное коэффициента усиления преобразователя :

$$k_u = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\phi}}{U_{упмакс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{10} = 53,740,$$

где  $U_{упмакс} = 10$  В, – максимальное значение напряжения управления.

Принимаем несущую частоту инвертора  $f_{инв} = 10$  кГц [30]

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_u = \frac{0,5}{f_u} = \frac{0,5}{10 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с},$$

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

Расчет параметров двигателя проведем последующим выражениям.

Индуктивность эквивалентная обмоток:

- статора:  $L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 0,0614 + 0,9107 \cong 0,9721$  Гн ;
- ротора:  $L_2' = L_{2\delta}' + L_\mu = 0,0791 + 0,9107 \cong 0,9898$  Гн .
- 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 :

$$R_s = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2} = 0,021 + 0,015 \cdot \frac{0,9171^2}{0,079^2} = 2,042.$$

Электромагнитные постоянные времени :

$$T_s = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_s} = \frac{0,138 \cdot 0,9171}{2,042} = 0,066 ;$$

$$T_2 = \frac{L_1}{R_2'} = \frac{0,9171}{0,015} = 61,14 \text{ с}.$$

Эквивалентный момент инерции и момент инерции механизма привода рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

Момент инерции механизма :

$$J_{\text{м}} = 0,5 \cdot J_{\text{об}} = 0,5 \cdot 0,35 = 0,175.$$

Эквивалентный момент инерции привода :

$$J_{\text{э}} = J_{\text{об}} \cdot J_{\text{м}} = 0,35 \cdot 0,00069 = 0,00024$$

## Расчет батареи

Для указания номинальной емкости производители используют расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени. Экспонента Пекерта чаще рассчитывается на базе измерения времени полного разряда ( $T_1$  и  $T_2$ ) для двух разных токов ( $I_1$  и  $I_2$ ). Для ориентировочных расчетов можно использовать графики или таблицы разрядки, предоставляемые производителем аккумулятора .

Так как  $C_p$  – константа, мы можем записать такое уравнение:

$$C_p = I_1^n \cdot T_1 = I_2^n \cdot T_2.$$

Преобразуя выражение, получаем формулу расчета экспоненты Пекерта :

$$n = \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) / \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Основываясь на знании значений емкости Пекерта и экспоненты Пекерта можно рассчитывать время работы аккумулятора при определенной нагрузке:

$$T = \frac{C_p}{I^n}.$$

При расчете батареи станем исходить из-того, что будет электромобиль использован для внутригородских поездок с не менее постоянными остановками в пробках, на светофорах и определим время поездки периодом 15 минут,

это вполне реально для среднего российского города. При дальности хода 80 км и средней скорости 40 км/ час требуемое время хода 2 часа чистого времени.

При среднем токе потребления электродвигателя 50 А, рассчитаем аккумуляторную емкость:

$$C_p = I^n \cdot T = 0.4 \cdot 50 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А/час},$$

$$C_p = I^n \cdot T = 0,6 \cdot 50 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А/час}.$$

Из многообразия предложенных в ряде типовых батарей, мы выберем для использования в проекте батареи емкостью 120 А/час.

Из наличествующих в продаже на российском рынке аккумуляторов самую лучшую репутацию при оптимальной стоимости имеют аккумуляторы для Toyota Land Cruiser, артикул EA1004, емкостью 120 А/час, номинальное напряжение 12В.

### Расчет транзисторов

- Рассчитываем сколько приходится  $P_{тр}$  на одну фазу:

$$P_{1\phi} = \frac{P_{тр}}{m_{\phi}} = \frac{75}{3} = 25 \text{ кВт};$$

$P_{тр}$  – мощность асинхронного электродвигателя,

$m_{\phi}$  – количество фаз.

- Находим действующий ток:

$$I_{\text{действ}} = \frac{P_{1\phi}}{U_n} = \frac{25000}{120} = 208,3 \text{ А};$$

$U_n$  - номинальное напряжение аккумулятора.

- Рассчитываем импульсный ток:

$$I_{\text{импульс}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{действ}} = \sqrt{2} \cdot 208,3 = 295 \text{ А}.$$

- Находим пусковой ток :

$$I_{\text{пуск}} = I_{\text{кп}} \cdot I_{\text{импульс}} = 3 \cdot 295 = 885 \text{ А};$$



$I_{кп}$  - коэффициент пускового тока.

Выбираем коэффициент нагрузки транзистора равен 58%, т.е.=0,58.

- Далее рассчитываем ток транзистора:

$$I_{\text{транз}} = I_{\text{пуск}} \cdot \frac{1}{0,58} = 885 \cdot \frac{1}{0,58} = 1526 \text{ А}.$$

Выбираем IGBT транзистор, т.к. он быстрый и надежный. Выбираем из условия

$U = 2 \cdot U_n = 2 \cdot 12 = 24$  В двойного напряжения, для того чтобы выдерживал нагрузку. Из всех представленных нам транзисторов наиболее подходящий оказался IRG4BC30F, он способен выдержать до 600 В.

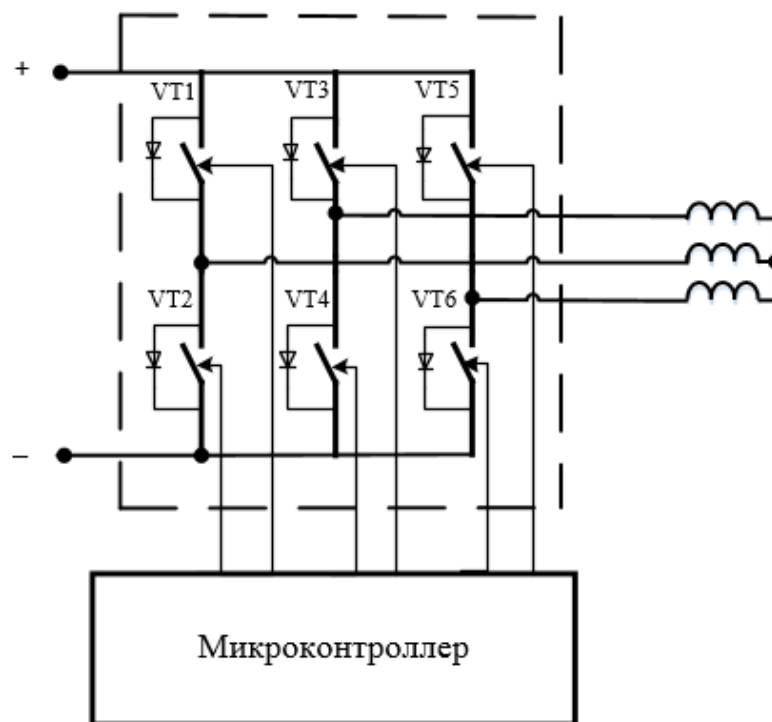


Рисунок 16 – схема преобразователя частоты (ПЧ)

Основным недостатком IGBT транзисторов является относительно большое время выключения, что берет в рамки частоты переключения до 20 – 100 кГц даже у самых быстродействующих транзисторов. Кроме того, с ростом частоты необходимо уменьшать ток коллектора.

Преимущества IGBT транзисторов, сопротивление между электродами во включенном состоянии.

Так же выбираем датчик тока, соблюдая условие, что  $I_H$  транзистора, будет не меньше  $I_{\text{транз}}$  расчетного. Избираем датчик тока LEM Website серии LTC 1000-TF/SP20, с  $I_H = 2000$  А.

Выбрав транзисторы, датчика тока. Далее выбираем тип микроконтроллера, на него поступают сигналы с ключей VT1-VT6. Изучив предложенные на рынке микроконтроллеры, целесообразно будет выбрать микроконтроллер типа LPC2129, он выполняется на основе 16/32-разряда.

В настоящее время на российском «электронном» рынке устройства управления мощными полевыми и IGBT-транзисторами представлены фирмами Agilent Technologies, IR, Powerex, Semikron, STConcept.

Наиболее функционально полными являются драйверы фирм Semikron (серии SKHI) Наиболее подходящие драйвера серии SKHI 22A/H4.

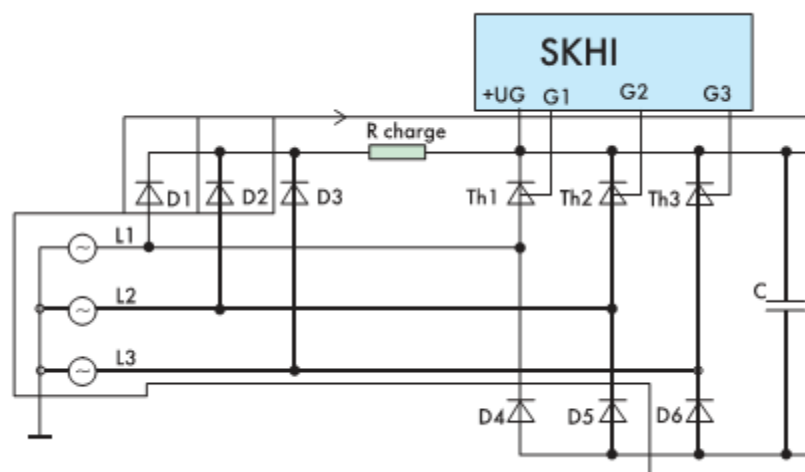


Рисунок 17 – схема подключения драйвера SKHI

#### 4.2.4 Выводы по разделу

В данном разделе проводили расчет параметров преобразователя. Так же для указания номинальной емкости используем расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени с помощью экспонента Пекерта. Далее необходимо из наличествующих в продаже на российском

рынке аккумуляторов выбрать самый оптимальный вариант подходящие под наши расчеты. Аналогично выбираем IGBT\_транзистор, датчик тока LEM Website, драйвера серии SKHI.

## **ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В рамках данной главы магистерской диссертации рассматривается экономическая целесообразность исследования отказоустойчивого асинхронного электропривода. 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 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта**

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности проекта необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по ниже приведенной формуле [32].

$$HTU = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$  – го признака;

$\Pi_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 4 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.7
Теоретический уровень	0.5
Возможность реализации	0.3

Таблица 5 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
<b>11-14</b>	<b>Высокий НТУ</b>

Таблица 6 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
<b>Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)</b>	<b>6</b>
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 7 – Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
<b>В течение первых лет</b>	<b>10</b>
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
<b>Народное хозяйство</b>	<b>10</b>

$$k_1=0.7, \Pi_1=6, k_2=0.5, \Pi_2=6,$$

$$k_3=0.3, \Pi_3=10, k_4=0.3, \Pi_4=10,$$

$$НТУ = 0.7 \cdot 6 + 0.5 \cdot 6 + 0.3 \cdot 10 + 0.3 \cdot 10 = 13.2$$

По полученным результатам расчета можно сделать вывод, что данный проект имеет высокий коэффициент научно-технического уровня, при этом

имеет сравнительно высокие возможности реализации так как может быть использован во многих отраслях за короткое время реализации.

## **5.2 Планирование научно-исследовательских работы**

Планирование проекта – это составление планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а также трудовых и материальных ресурсов. Составим перечень проводимых работ, определив их исполнителей, а также определим количество дней, потраченных на выполнение этих работ.

Для выполнения перечисленных работ требуются следующие специалисты:

- студент (С);
- научный руководитель (НР).

Основные задачи:

1. Взаимная увязка этапов работ проекта;
2. Согласование выполнения отдельных этапов работ во времени, определение их трудоемкости и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
3. Определение общего объема работ и необходимых для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов.

Таблица 8 – Перечень работ по реализации проекта

<b>№</b>	<b>Наименование работы</b>
1	Постановка целей и задач
2	Знакомство с литературой по теме, обзор схемотехники существующих испытательных стендов
3	Составление технического задания
4	Изучение технологического процесса
5	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения
6	Выбор и обоснование силовой части
7	Расчет силовой части
8	Разработка схемы и алгоритма работы испытательного стенда, патентование разработанной схемы

9	Формирование имитационной модели, проведение экспериментов
10	Публикация результатов исследований
11	Оформление пояснительной записки
12	Проверка готовой пояснительной записки руководителем

### 5.3 Определение трудоемкости работ

Трудоемкость выполняемых при разработке проекта работ определяется по сумме трудоемкостей этапов и видов работ, оцениваемых экспертным путем в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Одной из основных целей планирования научно – исследовательской работы является определение общей продолжительности ее проведения. В настоящее время для определения ожидаемого значения продолжительности работы  $t_{ож}$  применяются несколько вариантов использования вероятностных оценок продолжительности. Рассмотрим один из них:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{MIN} + 2 \cdot t_{MAX}}{5},$$

где  $t_{min}$  — минимально возможное время, за которое может быть выполнена работа, измеряется в чел- дн.;

$t_{max}$  — максимальное время, за которое работа может быть выполнена, измеряется в чел.- дн.

Для определения трудоемкости выполнения проекта воспользуемся формулой:  $T = n \times t_{ож(ij)}$ ,

где  $T$  – трудоемкость, чел.×дн.;

$n$  – количество исполнителей, человек;

$t_{ож(ij)}$  – продолжительность работ, дней.

Результаты сведем в таблицу 9.

Таблица 9 – Данные по трудоемкости работ

№ этапа	Кол-во исполнителей	Кол-во дней	Продолжительность работ			Т, чел/д н	% от всего времени
			$t_{MIN}$	$t_{MAX}$	$t_{ож}$		

							выполнения НИР
1	Руководитель Студент	5	4	7	5	10	1,359
2	Студент	21	14	30	21	21	5,707
3	Руководитель	7	7	14	10	10	1,9
4	Студент	21	14	21	18	21	5,707
5	Студент	14	10	14	14	14	3,804
6	Руководитель Студент	7	4	7	7	14	2
7	Студент	3	2	4	3	3	0,815
8	Руководитель Студент	30	18	30	25	50	8,152
9	Студент	186	120	200	180	180	50,543
10	Руководитель Студент	60	48	100	60	120	16,304
11	Студент	7	5	14	10	10	1,8
12	Руководитель Студент	7	7	14	12	24	1,9

На следующем этапе осуществим построение линейного графика работ (рисунок 18), который является простым и наглядным, отражающий этапы и продолжительность выполнения каждого вида работ в сравнении между ожидаемым временем и затраченным.

Общая продолжительность НИР составила 368 рабочих дней ( $t_{\text{раб}}$ ), при этом не учитывались выходные и праздничные дни. Для учета выходных и праздников переведем рабочие дни в календарные, для перевода воспользуемся формулой:

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{раб}} / k_{\text{пер}} = 368 / 0.66 = 558 \text{ дней,}$$



$t_{\text{кал}}$  - общая продолжительность НИР в календарных днях;

$t_{\text{раб}}$  - общая продолжительность НИР в рабочих днях;

$K_{\text{пер}}$  – переводной коэффициент равный 0,66.

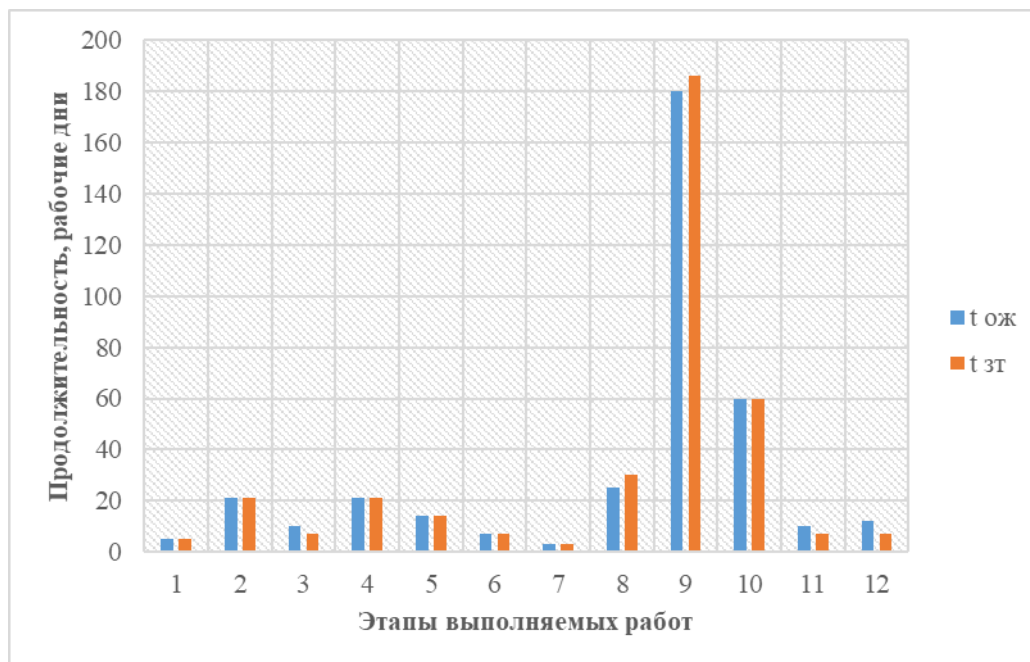


Рисунок 18 – Линейный график работ

Ожидаемое время работы  $T_{\text{ож}} = 365$  дней.

Затраченное время работы  $T_{\text{зт}} = 368$  дней.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: студента (С) – 361 дня, научного руководителя проекта НР - 116 дней.

#### 5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Расчет материальных затрат

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включены расходы на приобретение оргтехники и расходы на оформление документации (в том числе канцелярские принадлежности). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 10.

Таблица 10 – Материальные затраты

Материалы и оборудование	Ед. изм	Срок службы, год	Кол-во ед	Цена за ед, руб	Затраты, руб

Компьютер	шт	7	1	27000	27 000
Принтер лазерный цветной	шт	5	1	5500	5 500
Бумага формата А4	лист	-	500	0,2	300
Картридж ч/б	шт	-	1	400	700
Брошюровка документов			1	70	70
Всего за материалы:					33 570
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)					19502.4
Итого по статье С <sub>м</sub>					53 072.4

### 5.5 Календарный план

Календарное планирование в управлении проектами – это ключевой и важный процесс, результатом которого является утвержденный руководством 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, их длительностей, необходимых ресурсов, которое служит основой для исполнения проекта.

Составление календарного плана-графика проекта включает в себя несколько аспектов. Должны спланировать сроки и длительности работ, определить их последовательность и взаимосвязи, подумать о необходимых ресурсах. В дальнейшем, когда проект перейдет на стадию исполнения, то есть практической реализации запланированных действий, именно по этому плану-графику мы отслеживаем ход выполнения работ. И, если что-то в проекте пойдет не так, можно, сверив с первоначальным планом проекта, внести соответствующие изменения [33].

Ниже приведем перечень работ, представленных в таблице 11.

Таблица 11 – Список работ на 2017-2018

Календарный план на 2017-2018 годы										
Вид работы	2017год				2018 год					
	сен.17	окт.17	ноя.17	дек.17	январ.18	февр.18	мар.18	апр.18	май.18	июн.18
Постановка целей и задач										
Знакомство с литературой по теме, обзор схемотехники существующих испытательных стендов										
Составление технического задания										
Изучение технологического процесса										
Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения										
Выбор и обоснование силовой части										
Расчет силовой части										
Разработка схемы и алгоритма работы испытательного стенда, патентование разработанной схемы										
Формирование имитационной модели, проведение экспериментов										
Публикация результатов исследований										
Оформление пояснительной записки										
Проверка готовой пояснительной записки руководителем										

## 5.6 Бюджет затрат на разработку проекта

При составлении бюджета затрат на разработку проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям [31]. На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости разработки данного проекта, приведенной в таблице 12.

Таблица 12 – Калькуляция плановой себестоимости разработки проекта

Статьи затрат	Сумма затрат, руб.
Материальные затраты	53072,4
Затраты на оплату труда	122317
Отчисления на социальные нужды	32121
Накладные расходы	30900
Прочие затраты	12231,72
Себестоимость проекта	250642,12
Плановые накопления (прибыль 15,5%)	37596,31
Бюджет проекта	538880,24

## 5.7 Полная заработная плата исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как:

$$Z_{полн} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Заработная плата инженера главного специалиста определяется как:

$$Z_{П} = Z_{осн} + Z_{доп};$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, составляет  $0,15 \cdot Z_{осн}$ ;

$Z_{осн}$  – основная заработная плата.

Размер основной заработной платы определяется по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p;$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата;  $T_p$  – суммарная продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником.

Размер среднедневной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D};$$

где  $Z_M$  – месячный оклад научно-технического работника;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска ( $M = 10$  для пятидневной рабочей недели и отпуске в 48 календарных дней);

$F_D$  – действительный годовой фонд научно технического персонала (определяется за вычетом выходных, праздничных и больничных дней).

Месячный оклад научно-технического работника определяется по формуле:

$$Z_M = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{np}) \cdot k_p;$$

где  $Z_{ТС}$  – заработная плата по тарифной ставке;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент, 0,15;

$k_p$  – районный коэффициент, для наших исследуемых зон возьмем усредненный 1,3.

Размер заработной платы по тарифной ставке определяется по формуле:

$$Z_{ТС} = T_{ci} \cdot k_T;$$

где  $T_{ci}$  – тарифная ставка работника;  $k_T$  – тарифный коэффициент в зависимости от ставки.

С помощью представленных выше формул находим основную заработную плату руководителя НТИ:

$$Z_{ТС} = T_{ci} \cdot k_T = 26300 \cdot 1,407 = 37004 \text{ руб};$$

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{np} + k_D) \cdot k_p = 37004 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 62536,76 \text{ руб};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D} = \frac{62536,76 \cdot 10}{365 - 126} = 2616,6 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 2616,6 \cdot \frac{30}{8} = 9812,25 \text{ руб};$$

$$Z_{II} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} + 0,15 \cdot Z_{\text{осн}} = 9812,25 + 0,15 \cdot 9812,25 = 11284,08 \text{ руб}.$$

По аналогии рассчитаем заработную плату студента за данную исследовательскую работу:

$$Z_{TC} = T_{ci} \cdot k_T = 17000 \cdot 1 = 17000 \text{ руб};$$

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{np} + k_D) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 28730 \text{ руб};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D} = \frac{28730 \cdot 10}{365 - 126} = 1202,09 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 1202,09 \cdot \frac{576}{8} = 96550,62 \text{ руб};$$

$$Z_{II} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} + 0,15 \cdot Z_{\text{осн}} = 96550,62 + 0,15 \cdot 96550,62 = 111033,213 \text{ руб}.$$

## 5.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На основании пункта 1 ст.58 Федерального закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году вводится пониженная ставка – 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{внеб1} = 0,302 \cdot (9812,25) = 2963,299 \text{ руб.}$$

$$Z_{внеб2} = 0,302 \cdot (96550,62) = 29158,287 \text{ руб.}$$

## 5.9 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= Z_{проч.} \cdot k_{нр} = (Z_{спец} + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ &= (39000 + 106362,87 + 15954,4 + 32121,586) \cdot 0,16 = 30950,2 \text{ руб} \end{aligned}$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%.

## 5.10 Расчет прочих затрат

В эту статью расходов в данном проекте включены расходы по командировкам исполнителей, связанных с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от затрат на оплату труда всего персонала, занятого на выполнении данного проекта. Расчет прочих затрат сведем в таблице 13.

Таблица 13 – Прочие затраты

Затраты на оплату труда, руб.	Прочие затраты (расходы по командировкам 10%), руб.
122317,29	12231,72

На рисунке 19 с помощью диаграммы отобразим структуру затрат, составляющих себестоимость в общем бюджете проекта.



Рисунок 19 – Структура затрат себестоимости проекта

В результате выполнения работы была разработана имитационная модель по исследованию отказоустойчивого асинхронного электропривода. Техническое решение позволяет проводить испытания как номинальных, так и аварийных и неполнофазных режимов работы. С помощью имитационных моделей можно произвести проверку на адекватность, проводить испытания асинхронного двигателя в различных режимах работы. Результаты проверки опубликованы в 8 различных публикаций на территории РФ. На данное разработанное техническое решение было запатентовано и получено три патента на изобретение под номером №2016132914, №2017105664, №2017105667.

### **Выводы по 5 главе**

В данной главе произведен расчет стоимости ресурсов научно-технического исследования (НТИ), оценки инновационного потенциала НТИ, а также произведено составление плана выполнения работ.

В разделе были рассчитаны различные виды затрат, проанализирован бюджет затрат на научно-исследовательскую работу, по итогам всего проекта хотелось бы отметить, что данный проект является весьма стабильным и устойчивым, имеет минимальное количество угроз. Так же на основе исследований хотелось бы отметить, что коммерческий и инновационный потенциал данного проекта высок. Проект обладает высокой степенью новизны и перспективностью. Для реализации данного проекта затраты



минимальны, а практическая значимость весьма высока, у данного проекта сравнительно высокий уровень новизны, возможности реализации по времени и масштабам применения.

## ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Процесс работы заключается в анализе методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом, построение имитационной модели асинхронного двигателя (АД) для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы. Результатом работы будет представление модели объекта исследования, анализ графиков на адекватную работоспособность, составление рекомендаций касательно работы.

Технологический процесс разработки и проверки системы управления отказоустойчивого асинхронными двигателями заключается в следующем:

- Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике. На основании этого пункта создается и строится математическая модель отказоустойчивого асинхронного двигателя (АД) в наиболее применимой форме для дальнейших исследований.
- создание метода разработки системы управления для АД;
- компьютерное моделирование системы управления;
- анализ полученных результатов моделирования;
- анализ полученных результатов проверки.

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- пользовательский компьютер;
- монитор.

Оборудование находится в закрытом помещении (кабинет, аудитория), имеющим один выход и 2 окна, работа выполняется на персональном компьютере, с помощью которого обрабатывается вся информация.

В данном разделе магистерской диссертации рассматриваются следующие вопросы:

- организация рабочего места пользователя ПК;
- определение оптимальных условий труда пользователя ПК.

## **6.1 Производственная безопасность**

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [35] в помещении лаборатории на разработчика могут негативно действовать следующие опасные и вредные производственные факторы (ОВПФ):

Опасные производственные факторы (ОПФ):

- опасность поражения электрическим током;

Вредные производственные факторы (ВПФ):

- повышенная и пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенная интенсивность теплового излучения рабочей зоны;
- повышенная и пониженная влажность воздуха;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень статического электричества;
- повышенная яркость света;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенный уровень шума.

Далее более подробно рассмотрены опасные и вредные факторы, воздействующие на разработчика, возникшие в связи с разработкой данной системы.

### **6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности**

#### **6.1.1.1 Производственные метеоусловия**

В настоящее время компьютерная техника широко применяется во всех областях деятельности человека. При работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов. В соответствии с нормативно-технической документации при нормировании параметров микроклимата выделяют: теплый период года — период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного

воздуха выше +10° С, холодный период года — период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха равной +10° С и ниже. Среднесуточная температура наружного воздуха — средняя величина температуры наружного воздуха, измеренная в определенные часы суток через одинаковые интервалы времени. Она принимается по данным метеорологической службы. Разграничение работ по категориям осуществляется на основе интенсивности общих энергозатрат организма в ккал/ч (Вт). [36]

Микроклимат производственных помещений — метеорологические условия внутренней среды этих помещений, которые определяются действующим на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры поверхностей ограждающих конструкций, технологического оборудования и теплового облучения.

Лаборатория является помещением I а категории (с интенсивностью энергозатрат, сопровождающиеся незначительным физическим напряжением), поэтому должны соблюдаться следующие требования, приведенные в таблице 14:

Таблица 14 – Оптимальные параметры микроклимата во всех типах учебных помещений с использованием ПЭВМ [3]

Температура, °С	Относ. влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	< 0,1
20	58	< 0,1
21	55	< 0,1

В помещениях, оборудованных ПЭВМ, проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ. [37]

Для создания и автоматического поддержания в лаборатории независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное

отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры.

### **6.1.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

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) [38].

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 добавляется местное освещение.

Согласно СНиП II-4-79 в помещениях 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 люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно [39].

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 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [36]. В таблице 15 приведены характеристики исследуемого помещения.

Таблица 15 – 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

Помимо этого, нормируются светотехнические параметры дисплея, размеры монитора и символов, цветовые параметры, яркость дисплея, частота

обновления кадров, которые влияют на состояние зрения. Низкая освещенность дисплея ухудшает восприятие информации, а слишком высокая приводит к уменьшению контраста изображения знаков, что вызывает усталость глаз, именно из-за нагрузки на зрение через непродолжительное время у пользователя возникает головная боль и головокружение. Если работать на компьютере достаточно долго, то зрительное переутомление может привести к устойчивому снижению остроты зрения. Основными осложнениями при длительной работе на компьютере являются утомление глаз и возникновение головной боли. Существенным фактором, влияющим на утомление глаз, является частота перевода взгляда с дисплея на клавиатуру.

Таблица 16 – Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

N	Параметры	Допустимые значения
1	Яркость белого поля	Не менее 35 кд/кв.м
2	Неравномерность яркости рабочего поля	Не более +-20%
3	Контрастность (для монохромного режима)	Не менее 3:1
4	Временная нестабильность изображения (непреднамеренное изменение во времени яркости изображения на экране дисплея)	Не должна фиксироваться
5	Пространственная нестабильность изображения (непреднамеренные изменения положения фрагментов изображения на экране)	Не более $2 \times 10(-4L)$ , где L - проектное расстояние наблюдения, мм

### 6.1.1.3 Запыленность

Пыль - это мелкие и мельчайшие твердые частицы с размером от 0,2 до 100 мкм, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе. С другой стороны, пыль - это один из производственных факторов, неблагоприятно влияющих на здоровье человека и вызывающих при длительном воздействии на организм ухудшение здоровья и профессиональные заболевания. Пылевыведение наблюдается практически при всех видах человеческой деятельности. В горнорудной промышленности - при бурении породы, взрывных работах, работах горных машин, транспортировке породы, сортировке, дроблении и т.п.

Гигиеническое нормирование. Основой проведения мероприятий по борьбе с производственной пылью является гигиеническое нормирование. Соблюдение установленных ГОСТом предельно допустимых концентраций (ПДК) — основное требование при проведении предупредительного и текущего санитарного надзора. Для воздуха рабочей зоны производственных помещений в соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96 [40]. Установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ.

Систематический контроль за состоянием запыленности осуществляют лаборатории центров санэпиднадзора, заводские санитарно-химические лаборатории. На администрацию предприятий возложена ответственность за поддержание условий, препятствующих превышению ПДК пыли в воздушной среде.

Методы и средства защиты от пыли:

- внедрение непрерывных технологий с закрытым циклом (использование закрытых конвейеров, трубопроводов, кожухов);
- применение индивидуальных средств защиты (очков, противогазов, респираторов, спецодежды, обуви, мазей).
- применение пылеуловителей

#### 5.1.1 Повышенный уровень шума

В помещениях с низким уровнем общего шума, каким является лаборатория, где работает разработчика, источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры или периферийное оборудование для ЭВМ (плоттеры, принтеры и др). Длительное воздействие этих шумов отрицательно сказываются на эмоциональном состоянии персонала.

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» [41] эквивалентный уровень звука не должен превышать 50 дБА. Для того, чтобы добиться этого уровня шума рекомендуется применять звукопоглощающее покрытие стен.

В качестве мер по снижению шума можно предложить следующее:



- облицовка потолка и стен звукопоглощающим материалом (снижает шум на 6-8 дБ);
- экранирование рабочего места (постановкой перегородок, диафрагм);
- установка в компьютерных помещениях оборудования, производящего минимальный шум;
- рациональная планировка помещения.

Допускаемые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах следует принимать [37]:

Таблица 17 – Допускаемые уровни звукового давления на рабочих местах

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

#### 6.1.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

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 18.

Таблица 18 – 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:	25 В/м 2,5 В/м

5 Гц – 2 кГц 2 – 400 кГц	
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 экрана монитора	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.

## **6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производённой среды**

### **6.2.1 Электроопасность**

Помещение лаборатории по опасности поражения электрическим током можно отнести к помещениям без повышенной опасности (сухое, беспыльное, с нормальной температурой воздуха и изолированными полами). [42]

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

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.

Причины поражения электрическим током:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, ламповых патронов, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением:
- Нерегламентированное использование электрических приборов.
- нахождение в непосредственной близости от токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В;
- прикосновение к токоведущей части и мокрой стене или металлической конструкции, соединенной с землей;
- одновременное прикосновение к двум проводам или другим токоведущим частям, которые находятся под напряжением;
- Отсутствие инструктажа сотрудников по правилам электробезопасности.

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

Организационные мероприятия включают в себя:

- 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);
- 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.);
- назначение ответственных за электрохозяйство лиц;
- контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ;

- 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;
- контроль за надежностью СИЗ от поражения электрическим током.

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно [42] для электроустановок с напряжением до 1000 В.

### **6.2.2 Экологическая безопасность**

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в магистерской диссертации решений.

### **6.2.3 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

Объектом исследования является программное обеспечение – программный реализуемый алгоритм, позволяющий производить определение характеристик электрической нагрузки промышленных потребителей и как таковой не может нанести отрицательного влияния на окружающую среду. Но в данном подразделе целесообразно рассмотреть влияние, оказываемое компьютерной техникой, которая используется потребителями данного ПО.

По результатам исследований, обыкновенные ПК загрязняют окружающую среду не хуже транспортных средств. Работающий компьютер уменьшает влажность воздуха. Ученые подсчитали, что сейчас, когда человечество выбрасывает в атмосферу огромное количество углекислого газа, 2% всех выбросов приходится на электронику. Когда серверу приходится работать, в окружающую среду выделяется очень большое количество тепла и углекислого газа.

В первую очередь, необходимо повышать качество персональных

компьютеров, за счёт установки на них нового программного обеспечения.

Таким образом, материнские платы, мощные блоки и сервера, затрачивая меньшее количество энергии, будут обеспечивать большую производительность, что должно привести к снижению темпов роста выбросов углекислоты. Также необходимо использовать более эффективные источники питания и использовать менее мощные компоненты системы.

Каждый персональный компьютер содержит не только ценные цветные металлы, но и целый набор опасных для окружающей среды веществ. Это производные газов, тяжелые металлы, среди которых кадмий, ртуть и свинец. Попадая на свалку, все эти вещества под воздействием внешней среды постепенно проникают в почву, отравляют воздух и воду. [44]

Компьютеры не подпадают под общее положение, они должны быть утилизированы в определенном порядке и только на предприятиях, имеющих официальные разрешения на переработку опасных отходов и металлолома.

Этапы работ по утилизации компьютеров:

- экспертиза оборудования, подлежащего утилизации;
- оценка содержания в нем драгоценных металлов;
- определение веса и объема вывозимого оборудования;
- заключение договора на утилизацию вычислительной техники, подготовка заключения для оформления акта списания утилизируемой техники учета;
- вывоз утилизируемого оборудования
- завершающий этап - получение официального подтверждения в виде документа, сообщающего о том, что техника была утилизирована в соответствующем порядке и опасные отходы не будут загрязнять окружающую среду.

#### **6.2.4 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду**

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как техническая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математических моделей. Таким образом

процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **6.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект**

##### **исследований и обоснование мероприятий по предотвращению 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.

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть во время разработки программного обеспечения идентификации статических характеристик нагрузки – пожар.

Согласно Федеральному закону № 123-ФЗ от 22.07.2008 года



«Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [45] степень огнестойкости зданий принимается в зависимости от их назначения, категории по взрывопожарной и пожарной опасности, этажности, площади этажа в пределах пожарного отсека.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробоем изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

### **6.3.2 Профилактика пожароопасной ситуации (пожара)**

- Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара. Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожаропредупреждения и защиты.
- Одно из условий обеспечения пожаробезопасности – ликвидация возможных источников воспламенения.

### **6.3.3 Действия при возникновении пожароопасной ситуации (пожара)**

- При возникновении пожароопасной ситуации или пожара, персонал должен немедленно сообщить об этом по телефону 01 и спокойно объяснить: что горит, чему угрожает; адрес объекта; есть ли опасность для людей; назвать свою фамилию; немедленно обесточить всю электротехнику в помещении; обеспечить эвакуацию людей.

– Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-5 или ОП-5 (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, а также электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В, применяется для тушения ПК и оргтехники). При пожаре поднести огнетушитель как можно ближе к огню, направить раструб в очаг пожара, сорвать пломбу (выдернуть чеку), открыть вентиль, нажать на пусковой рычаг, направить струю выходящего газа на огонь. Во время работы раструб нельзя держать рукой, т. к. он имеет очень низкую температуру.

## **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны)**

#### **правовые нормы трудового законодательства.**

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации и договору № 959 от 01 сентября 2016 года заключённому между АО «Системный оператор Единой энергетической системы» и Национальным исследовательским Томским политехническим университетом каждый сотрудник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

#### **6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Производственная деятельность разработчика, заставляет его продолжительное время находиться в сидячем положении, которое является вынужденной позой, поэтому организм постоянно испытывает недостаток в подвижности и активной физической деятельности. При выполнении работы сидя большую роль играет плечевой пояс. Перемещение рук в пространстве влияет не только на работу мышц плечевого пояса и спины, но и на положение позвоночника, таза и даже ног.

По условиям работы рабочее место разработчика относится к индивидуальному рабочему месту для работы сидя.

Рабочее место разработчика должно занимать площадь не менее 6 м<sup>2</sup>, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м<sup>3</sup> на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Желательно, чтобы рабочий стол оператора при необходимости можно было регулировать по высоте в пределах 680 - 780 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол оператора должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит оператору удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см.

Рабочий стул разработчика должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах 400 - 500 мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах 90 - 110 °.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Fault-tolerant asynchronous electric drive for a hybrid vehicle

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM6Ж	Сенькив Елена Петровна		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

## **Introduction**

The widespread use of variable 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 variable speed induction motor drive systems is of paramount importance in ensuring a continuous and almost disturbance-free operation under any motor-drive fault conditions. For a hazardous production facility, the development of semiconductor technology has given impetus to the development of long-known electric drive systems in new applications. An indispensable element of any production facility is an asynchronous electric drive. At present it is becoming more popular due to its simplicity, high energy performance and a large range of regulation at a relatively small price. Thanks to development the electric motors have found application in different branches, for example, automotive vehicle production. Moreover, electric motors can be used either separately or with an internal combustion engine (ICE), which makes it possible to be protected from the operation of the ICE in small load mode and also with increasing fuel efficiency of the ICE, to realize the recovery of kinetic energy. No less common type of hybrids are cars, in which the motor is combined with engines working on compressed air. Vehicles with electromechanical transmission, such as diesel locomotives, need to be distinguished from hybrids [49,50].

The major benefits are:

- Economical operation
- Less ecological impact
- Improved running characteristics
- Increased mileage

- Energy conservation and reuse
- Conventional fueling

However, there are some disadvantages:

- High complexity
- Need of batteries
- Danger to pedestrians (due to its noiselessness)

Moreover, often an asynchronous electric drive, like other technical devices can fail. In conditions where the requirements to survivability are converted to electric drives, it is advisable to consider emergency two-phase modes of the electric drive. One of the main elements of the electric vehicle is the electric motor which serves to develop the torque necessary for the motion. As a traction motor, three-phase asynchronous electric a.c. machines with power from 15 to 200 and more kW are used. The electric motor has high efficiency and less energy loss. The efficiency of the electric motor is 90%, compared to 25% for internal combustion engines.

The main advantages of the electric motor are:

- Realization of the maximum torque in all range of speeds;
- Ability to work in two directions without additional devices;
- Simplicity of design, air cooling;
- Ability to work in a generator mode.

It is obvious that the increase in fault tolerance is inextricably linked with the reliability of electric drives that ensure the functional properties of the electric vehicle within the specified limits. To provide the survivability property is possible on the basis of the technology of building redundant systems, using a combination of the following types of redundancy: structural, functional, time, information and load [53].

### **Analysis of known methods for providing an asynchronous electric drive with the property of fault tolerance**

The AC drive built on the basis of asynchronous motors is the basis for the organization of almost all technical complex systems of translational and rotational principle of action. There is a need to ensure the safety and fault tolerance of the

drive in virtually all industrial sectors. The objects property is to retain limited performance in the presence of defects or damages of a certain type, and also when some components fail, is defined by the term "survivability". Survivability is a property that characterizes the ability of a system to function effectively when receiving damage (phase failure) or to restore this ability within a given time. In our case, survivability is a complex property of the system, and it manifests itself, when, during the start-up of a vehicle, after an unresolved accident, the process of starting the vehicle does not differ from normal operation, taking into account the limitations on reduced drive power of the wheel, which is retained in the on-board computer and displayed on the control panel [50].

There are three groups of faults:

- Malfunction of the electrical part of the electric motor and the mains;
- Malfunction of the mechanical part of the electric drive (including gearbox);
- Malfunction caused by the climatic parameters of the electric drive and the environment.

1. Malfunctions of an electric part of the electric motor and a feeding power supply are as follows:

- short circuit in the motor windings;
- overcurrent;
- breaks in the motor windings;
- short circuit of phase winding insulation on the housing;
- a power failure of one of the phases;
- occurrence of 1 or 2 phase mode of 3 phase motor;
- increase in the constant load on the shaft of the electric motor;
- unbalanced phases of the power supply;
- the drop in the speed of rotation of the motor shaft is lower than the nominal (the torque is exceeded);
- wrong phase rotation;
- breakage of one or more rods of the rotor;
- reduction of interturn and interfacial insulation (full or partial phase-to-phase short

circuit);

- changes in the frequency and voltage of the power supply for the allowed values;
- failure to work out a command to start the motor due to a failure (failure) of the power supply phase;
- failure in the functioning of the microcontroller (not the self-test operation).

2. Malfunction of the mechanical part of the electric drive are associated with:

- wedging of bearings;
- locking the rotor; blocked rotor;
- activation with the locked rotor;
- breakage of the coupling fingers, cutting of the key, breakage of the belt;
- increased vibration;
- deterioration of the reducer (defects in gears);
- wear of bearings;
- wear of the electromagnetic brake;

3. Malfunctions caused by the climatic parameters of the electric drive and the environment:

- The temperature rise of the active parts of the motor is higher than permissible;
- Reduction of the "heating tolerance of the motor to zero";
- The ambient temperature is higher than the allowable temperature;
- Overheating of bearings;
- Stop at the motor ventilation.

In this paper, emergency situations such as stator phase failure are considered. Processes occurring in an asynchronous motor with a phase failure of the supply. The consequences caused by loss of the motor phase with a connected phase circuit with connected phases can lead to motor failure and process failure for a typical wiring diagram. Emergency two-phase operation is a great danger to the motor. The currents flowing through the stator windings exceed the nominal values and depend on a large number of different factors such as the magnitude of the load torque, slip, winding connection scheme, etc. If the torques of the load exceed the critical torque of the motor in the two-phase operation mode, the motor will stop, in the case of



continuing operation, the motor may suffer from thermal damage and the electric drive failure. Proceeding from this, it can be concluded that the operation of the electric motor with the connected phases in the emergency two-phase operation mode is not permissible. Connecting the motor directly to the supply puts the system in the uncontrolled electric drive mode, which negatively affects the performance.

When using the load reserve, the full use of the electric drive equipment does not occur, which reduces the energy performance.

Let's take a closer look at functional and structural redundancy. The issues of ensuring the fault tolerance and survivability of the n-section asynchronous electric drive are described in the works of the Russian [53, 54, 55, 56, 57]. The increase in fault tolerance is inextricably linked with ensuring the survivability of electric drives in emergency operation modes.

By functional redundancy of a fault-tolerant asynchronous motor is meant the construction of an ED in which redundancy is performed by organizing a rotating circular field in the emergency two-phase mode of a three-phase IM, which provides the necessary survivability level. This approach makes it possible to provide survivability without additional hardware costs, but it is limited in application, because breakage of one of the motor phases may lead to power reduction, but possible compensate for it due to the load of IM.

The following papers on the use of functional redundancy of an asynchronous electric drive, as well as technical solutions obtained in patents, are known [59].

### **Schematic and algorithmic technical solutions for ensuring the survivability property**

1. Life expectancy in the electric drive can be ensured when considering a three-phase AD, as a mechatronic system with an unloaded reserve. When an emergency situation occurs, i.e. one of the IM phases can be translated in a two-phase operation mode with the possibility of realizing an algorithm for recovering operability.

2. Electro technical capacitors are not reliable, because there is electrical heating, so it's better when there are less capacitors in the circuit. The capacitor circuit is ideal,

but costly. With the help of a structural diagram of the car, it is possible to modernize the car without worsening the parameters to lead to survivability.

3. Asynchronous electric drive is carried out according to the principle of subordinate regulation of parameters. In the smallest part (the torque motor with the regulation parameter) is obliged to have current feedback. The current loop intended for working off of a preset value can be digital or analog. The structure of the current regulator is required to provide the maximum rate of increase of the current generated. The loop of feedback on the speed does not participate in the implementation of the recovery algorithm itself.

4. The asynchronous electric drive must contain, as part of the power converter, converter cells, state sensors, they generate three fault bits (phase winding of the cell motor or power converter) a, b, c that are credited to the controlled system to shut down the failed phase and implement the recovery algorithm. Polling, software status sensors should be implemented in each microcontroller control loop.

The functional diagram of a fail-safe hybrid vehicle with one drive and differential transmission to two driving wheels is shown in Figure 4. A structural reserve is a method that provides the survivability properties of an asynchronous electric drive by controlling a microcontroller with the implementation of the recovery of the workability algorithm on the basis of the elements in the reserve, which allows to restore fully operability with sudden failures of a frequency converter of the type "do not turn off the key" or "switch on the key" of the converter frequency [56, 57].

### **Mathematical modeling of the processes of an asynchronous electric motor**

If the multiphase electric machine is symmetrical and the voltage on its windings is sinusoidal, then it is convenient to analyze such a machine by presenting it in a two-phase coordinate system dq. However, in the study of asymmetric machines at study considering spatial harmonics or non-sinusoidal drive voltages to the two phase machine is non-valid, since the field in the gap of two-phase and multiphase machines under these conditions differ from each other [4, 5].

In equations setting-up and considering the transient the induction machines will use

the conventional assumptions and limitations associated with the concept of "idealized machine": the machine is not saturated, the iron loss is neglected; the phase windings are symmetrical and shifted by an angle of 120 electrical degrees; The magnetizing forces of the windings and the magnetic fields are distributed sinusoidally, along the circumference of the air gap; the air gap is uniform; the rotor is symmetrical. The real distributed winding is replaced by a concentrated winding whose phase axis is shifted by a phase angle, and its magnetizing force is equal to the magnetizing force of the real winding. If necessary, it is possible to abandon certain assumptions, for example, saturation of the magnetic circuit, loss in steel, asymmetry of the rotor, etc. can be taken into account.

To describe the transient processes of an asynchronous machine operating in the motor or generator mode, the equations of electrical equilibrium for the circuits, the electromechanical energy conversion equation, and the equation of motion of the electric drive are compiled.

The model of such machine is shown in Figure 20. There are three windings on the stator with the number of turns  $w_A$ ,  $w_B$ ,  $w_C$  and three windings on the rotor with the number of turns  $w_a$ ,  $w_b$ ,  $w_c$ . The rotor windings rotate at a speed, which means that the mutual inductances between the stator and rotor windings change as a function of the angle  $\theta$ .

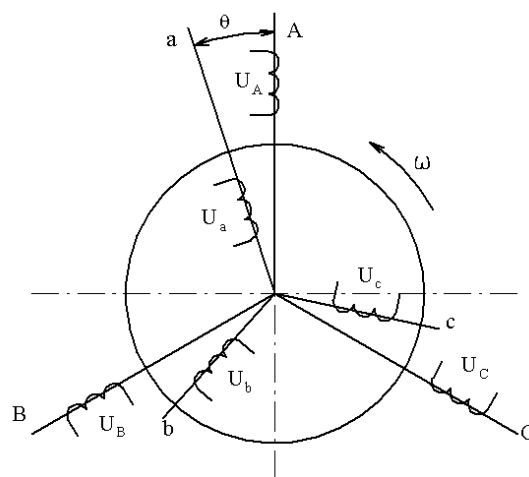


Figure 20 - Spatial model of IM in the natural coordinate system

To determine the currents in the transient process, the system of differential equations of instantaneous phase voltages of the stator windings must be solved for

given initial conditions [11]:

$$U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} \quad (2.1)$$

$$U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}$$

$$U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}$$

and instantaneous phase voltages of the rotor windings:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}; \\ U_b &= R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}; \\ U_c &= R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

where the indices A, B, C correspond to the stator windings, the indices a, b, c correspond to the windings of the rotor. Equation of Equilibrium of Motor torques:

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

M is the electromagnetic torque of the motor;

M<sub>S</sub> is the static torque of resistance;

J<sub>Σ</sub> - the total moment of inertia of the rotating masses, reduced to the motor shaft.

The model of a three-phase machine in the stationary coordinate system α, β, γ is shown in Fig. 4.

In the three-phase coordinate system α, β, γ, as in the two-phase coordinate system α, β, in the air gap the field is circular and can be represented by the resulting vectors of rotor currents, voltages and flux linkages, projected on the stator axis α, β, γ find expressions for the transformed values. The transformation matrix for the three-phase system is represented in Figure 21 [59]:

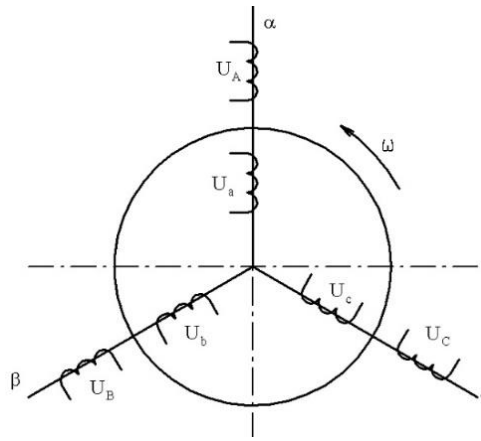


Figure 21 - Spatial model of IM in a three-phase coordinate system.

When considering the two-phase operation of a three-phase induction motor, two different modes can be distinguished:

- work in emergency mode with an elliptical field in an unregulated electric drive;
- work in emergency mode with algorithmic support of a circular rotating field in a frequency-controlled electric drive.

In the case of emergency two-phase operation of the motor, it is possible to decompose the elliptical field in the air gap, using the symmetric component method, into the fields of the forward and reverse sequences. The generalized model of an electric machine takes into account only the field of direct sequence. There are two options for representing the model of an asynchronous motor working with an elliptical field - a model of a generalized electric machine with two stators and two rotors, the model of a generalized electric machine with two stators and one rotor [51]. The first model is simpler in description, but it does not give exact results of simulation of transient processes. The second model has more complicated expressions for the resulting electromagnetic torque, but gives more accurate results in dynamic modes of operation.

In connection with the above-mentioned features of the mathematical description of a generalized electric machine with an elliptical field, a model with two stators and two rotors was chosen to form a mathematical model (Figure 22).

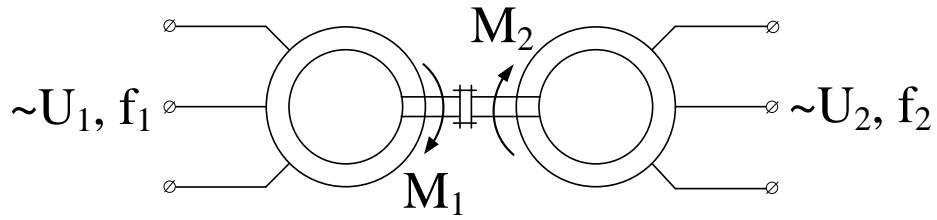


Figure 22 - Diagram of an electric machine with two stators and two rotors

In the study of asymmetrical machines, taking into account spatial harmonics or in the presence of non-sinusoidal supply voltages, it is wrong to drive a two-phase machine, since the fields in the gap of the two-phase and multiphase machines differ in these conditions [1,2]. Since an asynchronous motor is unbalanced when one of the phases of the supply breaks off - a generalized electric machine in a three-phase coordinate system is adopted as a mathematical model.

As a basis, the equations of the asynchronous motor model in the stationary coordinate system were taken. To simplify the calculations, the equations for the forward and reverse sequence fields are presented by separate systems.

When determining the voltages applied to the windings of machines responsible for the fields of the forward and reverse sequences, it was taken into account that for a constant supply voltage  $U_1 = U_A = U_B = U_C = \text{const}$ , the voltages of the forward and reverse sequences depend on the slip [55, 56].

The equations of a generalized electric machine having two stators and one rotor for a direct sequence field have the form:

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

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

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

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

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

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

Linkages for all phases:

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

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

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

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

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

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

Equations for the reverse sequence:

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

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

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

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

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

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

Linkages for all phases:

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

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

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

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

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

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

Electromagnetic torque  $M_1$  and,  $M_2$  developed by fields of a direct and an inverse sequence, are determined by the following expressions:

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

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

Equation of motion of the electric drive, taking into account the torques of the direct and reverse sequence:

$$M_1 + M_2 - M_c = \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.18) \quad M_1 + M_2 + M_3 + M_4 - M_c = \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.19)$$

### The choice of the method of high-speed motor control in the system frequency converter - asynchronous motor (FC-IM)

The most important ways of controlling an asynchronous variable frequency electric drive and their indices are given in Table 18.

Table 18 - Control methods in the IF-AD system and their indicators

Method of control	Adjustment range Speeds
Scalar control, control law  $U_1 / f_1 = const :$  - the open system, including with correction of the volt-frequency characteristic;  - Closed system with feedback on stator current and compensation of voltage drop on the active resistance of stator windings (IR compensation or load compensation);	less than 10          10



<p>- Closed system with feedback on stator current and compensation of voltage drop on the active resistance of stator windings and increase of stiffness of static characteristics (IR compensation and slip compensation);</p> <p>- closed system with speed feedback;</p>	<p>more than 10</p> <p>up to 120</p>
<p>Vector control:</p> <p>- without speed sensor (with internal model)</p> <p>- with a speed sensor</p>	<p>100–120</p> <p>1000</p>

We accept the control method - vector control with a speed sensor which has a control range of 20. Use of vector control allows to increase the power indicators of the electric drive, and also to ensure operability in the event of an emergency situation.

### **Structural diagram of the power channel of the EP.**

The electric drive of the power channel includes:

- A frequency converter that realizes the function of an electrical converter;
- An electric motor that performs the function of an electromechanical converter;
- A mechanical system that performs the function of a mechanical converter.

When solving the problems of synthesis and analysis of variable-speed electric drives, asynchronous models of the electric motor, compiled on the basis of an electric generalized machine, are often used and executed by a two-phase rotating coordinate system (x, y) or in a stationary one.

### **Functionality and performance of a fault-tolerant hybrid vehicle**

The functionality is achieved as follows:

An asynchronous three-phase motor is connected to a frequency converter made on a bridge circuit on six keys and connected via power circuits to a power storage device. In this case, in a working three-phase mode, a circular rotating field is created and three-phase currents with a phase shift of  $2\pi / 3$  flow in the motor windings. If the stator winding breaks in the drive motor or if one of the keys in the drive

frequency converter fails, the circular rotating field of the working motor becomes pulsating with zero torque after the accident, since the process of forming three-phase currents depends on the current flowing in the neighboring phase of the motor. In two operable phases, the currents will have a very similar amplitude with a phase shift  $\pi$ . When connecting the zero wire of asynchronous motors to the output voltages of the on-board electric power source in a three-phase operating mode, three-phase currents will also be formed, but the current flow in each phase will now not depend on the neighboring phase, which means that if one of the phases is lost in the two remaining phases Two-phase currents with a phase shift of  $2\pi / 3$  are formed. The field in the gap of the electric machine will be elliptical. The active power of the motor will drop by 33% and the elliptical field will not ensure uniform rotation of the motor, but limited functionality will be provided with the formation of the wheel drive survivability property. With a corresponding reduction of 33% of the power in the adjacent wheel drive, the handling of the vehicle will be restored. Functional in Figure No. 23.

A fault-tolerant hybrid vehicle operates as follows:

The driver of the vehicle from the console 9 (PU) removes the ignition key to the on-board computer 9 (PU), the signal for switching on the onboard power source 1 (IEE) of the power supply of the hybrid vehicle. Motion mode. In this case, the on-board computer 9 (PU) provides a control signal to the converter 3 (PEE) for its connection to the power accumulators of the accumulator 2 (NE) and converting the DC voltage of the batteries into alternating three-phase voltage. Next, the driver turns on the vehicle's direction of travel with the "forward-back" lever. In this case, the on-board computer 9 (PU) sends a signal to the electronic converter 3 (PEE) to switch the stator windings of the motors 5 to the selected direction of rotation of the drive of the wheels 4. The driver then sets the vehicle speed pedal through the on-board computer 9 (PU) to the electronic converter 3 (PEE) frequency of a three-phase voltage proportional to the speed of rotation of the wheel drive 4. In this case, the three-phase voltage of the specified frequency of the electronic converter 3 (PEE) is fed simultaneously to the stator windings of motors 5, front and / or rear

wheels 4, depending on the driver's choice of driving conditions based on road quality and speed limits. Pressing the brake pedal by the driver ensures that 9 commands on the electronic converter 3 (PEE) are issued by the onboard computer to switch the stator windings of the motors 5 to reverse motion and to change the frequency of the voltage proportional to the force of pressing the brake pedal. In this case, the motors 5 switch to the electric power generation mode, namely, the conversion when the inertial energy of the vehicle brakes to converts into electric energy.

In the event of an accident: a break in one of the phases of the winding of the stator of the motor 5 causes a drop in power, and the speed of the traffic falls. At the control input 7 information is received on the on-board computer 8 (BC) on the reduction of the current consumption by the electronic converter 3 (PEE) and on the control panel 9 (PU) there is information about the failure and on the available remaining resource according to the power of the drive motor 5. The speed of the movement decreases. In the case of starting the vehicle after an unresolved accident, the process of starting the vehicle does not differ from normal operation, taking into account the limitations on the reduced drive power of the wheel 4, which is stored in the on-board computer 9 (PU) and output to the control panel 9 (PU). The scheme contains a solution to the problem of fault tolerance of an asynchronous electric drive.

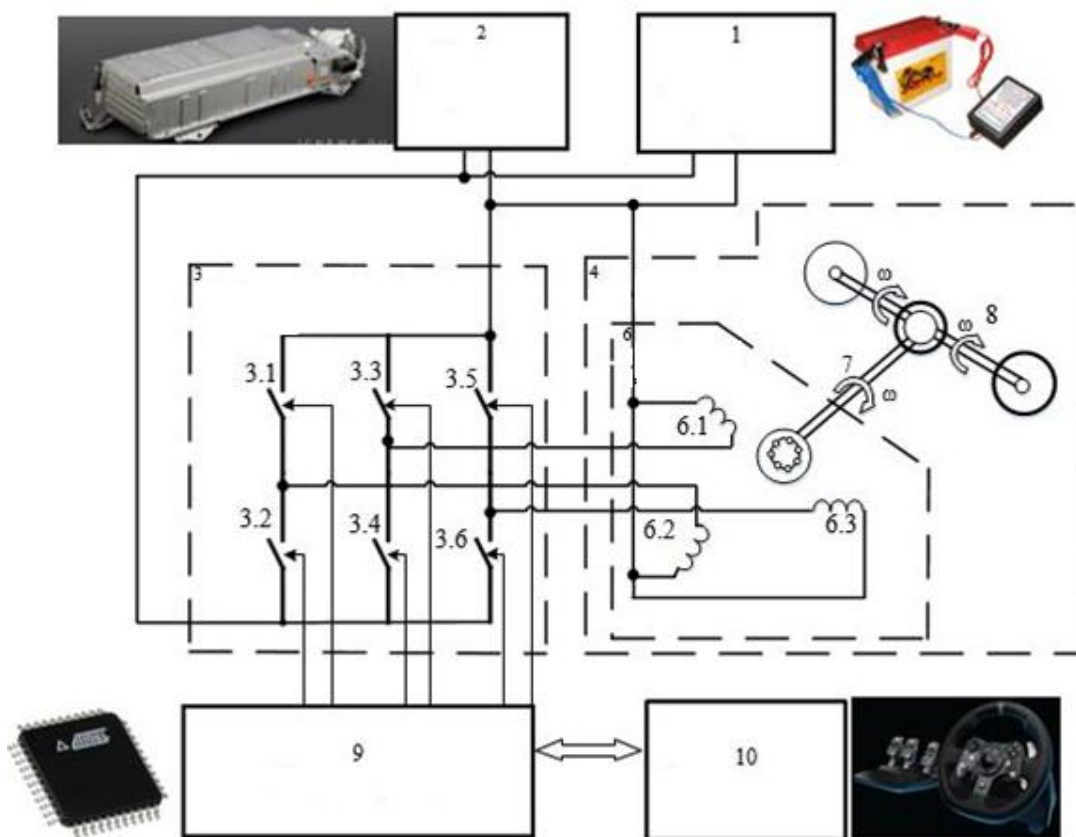


Figure 23 - Functional diagram of a fail-safe hybrid vehicle with one drive and differential transmission to two driving wheels

### Fault tolerant control algorithm for AM drive

The Emergency states asynchronous 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 operation mode. Emergency shutdown of such drives may impair the safe operation of the equipment at risk to staff with large economic losses.

Fault tolerance control of asynchronous 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 paper is to design algorithms for fault-tolerant control of asynchronous motor electric drive with scalar and vector control on the basis of control system simulation.

The condition 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  $\pi/3$  radians and non-sinusoidal currents for the scalar motor control. In the case of vector control is necessary to use the electric coordinate transformation [55]. This approach 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 of three-phase electric drive associated with the use of structural reserve [56].

The classification of designed algorithms of fault-tolerant control of induction motor electric drive is shown in Fig. 24 and Table. 20. 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.

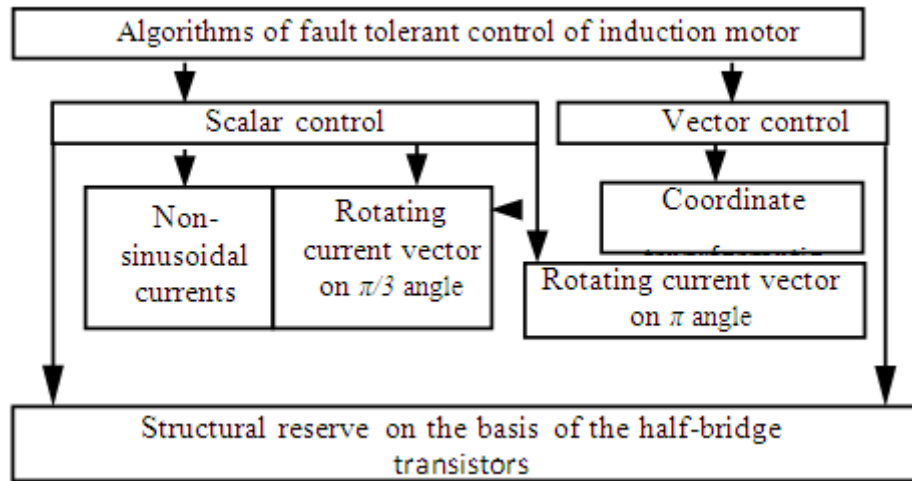


Figure 24 – The algorithms classification for the fault-tolerant control of induction motor electric drive

Table 20. 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

	Shift of current vector on $\pi$ radians		Shift of current vector on $\pi/3$ radians	
	Lagging phase	Leading phase	Lagging phase	Leading phase
Failure phase «A»				
Failure phase «B»				
Failure phase «C»				

## Conclusions

The review and the analysis of ways of the fault tolerance maintenance of the electric drive of an alternating current was made. The use of functional and structural redundancy is promising.

It is determined that for the construction of a fault-tolerant asynchronous electric drive it is required to provide continuous monitoring of the elements of the frequency converter and the stator winding of the motor, to organize a control system containing a recovery algorithm and allowing the use of a functional or structural reserve. These systems of control include the developed systems of vector and frequency-current [58 59] control.

An overview of ways to ensure fault tolerance of the drive has been carried out. Their advantages and disadvantages were determined.

It was found that for the construction of a fault-tolerant asynchronous electric drive it is required to provide continuous diagnostics of the elements of the frequency converter and the stator winding of the motor, to organize a control system containing a recovery algorithm and allowing the use of a functional or structural reserve. Such control systems include vector control systems.

Based on the mathematical model, the following were investigated:

- Simulated emergency mode of the stator or rotor phase of the induction motor;
- Simulated work in emergency mode with algorithmic support of a circular rotating field in a frequency-controlled electric drive and investigate the recovery algorithms for failure in one of the phases with an assessment of the quality of work.

The development of ensuring the survivability of a hybrid car, when the stator winding is broken in one of the motors or the key failure in the frequency converter of the corresponding wheel is proposed. While the vehicle contains  $m$ -wheel drives, where  $m \geq 2$ , and the zero wires of the asynchronous motors are connected with the output voltage of the onboard electric power source.

## Заключение

В диссертации разработана методология синтеза способов и методов отказоустойчивого управления электроприводом переменного тока, используемых в гибридном транспортном средстве. Определено, что для построения отказоустойчивого асинхронного электропривода требуется обеспечить непрерывную диагностику 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 системы векторного управления.

Выполненные научные исследования представлены следующими новыми результатами:

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

2. Предложена общая методика разработки математической модели электропривода переменного тока для схем подключения двигателей с развязанными фазами и работой с эллиптическим магнитным полем. Это дает возможность получить количественную оценку мгновенных параметров электропривода в аварийных (неполнофазных) режимах.

Был произведен расчет параметров преобразователя. Так же для указания номинальной емкости используем расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени с помощью экспонента Пекерта. Далее необходимо из наличествующих в продаже на российском рынке



аккумуляторов выбрать самый оптимальный вариант подходящие под наши расчеты. Аналогично выбираем IGBT транзистор, датчик тока LEM Website, драйвера серии SKHI.

Предложена разработка обеспечения живучести гибридного автомобиля при обрыве обмотки статора в одном из двигателей или отказе ключа в преобразователе частоты соответствующего колеса. При том, что транспортное средство содержит  $m$ -приводов колес, где  $m \geq 2$ , а нулевые провода асинхронных двигателей подключены с выходным напряжением бортового источника электрической энергии. Увеличение амплитуды тока обусловлено необходимостью компенсации мощности, ведь поле в зазоре электрической машины будет эллиптическим. Активная мощность двигателя упадет на 33% и эллиптическое поле не обеспечит равномерности вращения двигателя, но будет обеспечена ограниченная функциональность с формированием свойства живучести привода колеса. При соответствующем снижении на 33% мощности в соседнем приводе колеса управляемость транспортного средства будет восстановлена.

## **Список публикаций**

### **Патенты на изобретения:**

1. Гибридное транспортное средство с асинхронным двигателем. Однокопылов Г.И., Дементьев Ю.Н., Сенькив Е.П. №2016132914
2. Гибридное транспортное средство с асинхронным двигателем. Однокопылов Г.И., Дементьев Ю.Н., Сенькив Е.П., Розаев И.А. №2017105664
3. Гибридное транспортное средство с вентельным двигателем. Однокопылов Г.И., Дементьев Ю.Н., Сенькив Е.П., Розаев И.А. №2017105667

### **Публикации, участия, выступления научно-технические; сертификаты, дипломы, степени:**

1. 3 Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск. Тема доклада: «Исследование на математической модели трехфазного асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы». Диплом 1 степени. Авторы: Сенькив Е.П., Брагин А.Д.
2. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», г. Иркутск. Тема доклада: «Математическая модель асинхронного двигателя в аварийных и неполнофазных режимах работы». Диплом 2 степени. Авторы: Однокопылов Г.И., Сенькив Е.П., Брагин А.Д.
3. 7 Международная научно-техническая конференция, г. Томск. Тема доклада: Моделирование трехфазного асинхронного двигателя в аварийном режиме работы. Диплом степени. Авторы: Однокопылов Г.И., Сенькив Е.П., Брагин А.Д.
4. Научно-технической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», г. Хабаровск. Тема доклада: «Алгоритмическое восстановление работоспособности асинхронного электропривода в аварийном режиме работы». Диплом 1 степени. Авторы: Однокопылов Г.И., Сенькив Е.П., Брагин А.Д.

5. 4 Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск. Тема доклада: «Отказоустойчивый асинхронный электропривод для гибридного автотранспортного средства». Сертификат. Авторы: Сенькив Е.П., Розаев И.А.

6. 4 Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск. Тема доклада: «Сравнительный анализ отказоустойчивого управления асинхронного и вентильно-индукторного электропривода». Сертификат. Авторы: Однокопылов Г.И., Брагин А.Д., Розаев И.А., Сенькив Е.П.

7. 2 Всероссийская (с международным участием) молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику», г. Кемерово. Тема доклада: «Особенности гибридного автотранспортного средства при отказоустойчивом асинхронном электроприводе». Диплом 3 степени.

8. 2 Поволжская научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», г. Казань. Тема: Исследование неполнофазного режима работы двухсекционного асинхронного электропривода со свойством живучести. Авторы: Иванов К.В., Сенькив Е.П., Розаев И.А., Однокопылов Г.И.

**Статья в научной периодике, индексируемой международными базами данных (Web of Science, Scopus и др.)**

1. Glushkov S. V. , Kachalov N. A. , Senkiv E. P. , Glushkova V. O. Estimation of energy efficiency of residential buildings // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 92, Article number 01072. - p. 1-5

## Список литературы

1. 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.
2. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа; Логос; 2000. – 607 стр.
3. Петров Г.Н. Электрические машины, ч.2, Асинхронные и синхронные машины, М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, 416 с. с черг.
4. 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., нл.
5. Герман – Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 стр., ил.
6. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
7. Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. //Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.
8. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Повышение живучести частотно – регулируемого асинхронного электропривода // Известия ТПУ, Изд-во ТПУ, 2005, №7, с. 143-148.
9. Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Исследование в среде Matlab Simulink трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме работы // «Технические науки — от теории к практике»: материалы XVI международной заочной научно – практической конференции. — Новосибирск, 2012. — с. 125-130.

10. Однокопылов Г. И. , Брагин А. Д. , Однокопылов И. Г. , Столяров Д. П. Исследования асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2012 - №. 2 - С. 290-293.
11. Želmíra Ferková, Ján Kaňuch, Technical University of Košice. Two-Phase Asynchronous Motor - Simulation and Measurement // Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 100/2013 cz. II
12. Патент РФ на изобретение № 2326480, МПК H02H7/09, H02H7/12, Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, - № 2007112527; заявлено 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г. Бюл. №16.
13. Патент РФ на полезную модель № 128421, МПК H02P25/08, H02H 7/09, H02H 7/10, Асинхронный электропривод со свойством живучести / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин – № 2012153525/07; заявлено 11.12.2012 г.; опубл. 20.05.2013 г. Бюл. №14.
14. 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
15. Брагин А.Д. Исследование отказоустойчивого электропривода на основе резервных элементов // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно – технической конференции, 27 – 31 мая 2013г., г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – с. 57.

16. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно – регулируемых электроприводов : учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 20011. – 476 с.
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов : Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
18. 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.
19. 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.
20. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
21. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
22. Однокопылов И. Г., Орлов Д. Ю. Математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – 233 с.
23. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов.: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского Политехнического университета, 2007. – 152 с.
24. А.с. № 1746482 (СССР), МКИЗ Н 02 Р 7 / 42. Вентильный электропривод / Г.И. Однокопылов, А.П. Зайцев, Г.В. Обрусник, А.В. Петров, В.Н. Софронов. – Оpubл. в Б.И., 1992, № 25.
25. Pat. 5323093 (США), Int.Cl. Н 02 К 23 / 00. Brushless motor driving device / Kikuchi Atsushi. – Оpubл. 21.6.94.

26. Rechnergestützte Prüf – und Diagno – severfahren für Vorschubsantriebe / Weselow O., Chrapko P. // 11. Int. Fachtag. «Ind Autom.- Autom. Antriebe» Chemnitz, 12–14 Febr., 1991. – Chemnitz, 1991. – С. P 15/1 – P 15/4.
27. Pat. 5446354 (США), Int.Cl. H 01 R 39/46. Drive apparatus for brushless dc motor and failure diagnosing method for the same / Hiruma Atsuyuki. – Оpubл. 29.8.95.
28. 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. – 213с.
29. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
30. Интернет-ресурс–<http://www.elp.ru/digest/Vypryamiteli-regulatory-preobrazovateli-poluprovodnikovye/>
31. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
32. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
33. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
34. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика М.: Энергия, 1980. - 175 с
35. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». – Введен 01.03.2015 – Москва.
36. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий
37. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – Министерстве

юстиции Российской Федерации от 10 июня 2003 года, регистрационный N 4673.

38. СНБ 2.04.05-98 Естественное и искусственное освещение. - Минск: Министерство архитектуры и строительства, 1998. - 59 с.

39. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. Л., "Энергия", 1976.

40. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

41. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» – Введен 01.11.2015 – Москва.

42. Правила устройства электроустановок – Новосибирск: Норматика, 2014. – 464 с.

43. ГОСТ 12.4.124-83 ССБТ. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования – Введен 01.01.1984 – Москва

44. Утилизация компьютеров – необходимость, обусловленная уровнем развития человека [Электронный ресурс] URL: <http://greenologia.ru/utilizaciya-tekhniki/ofisnaya/kompyutery/utilizaciya-kompyutero.html>. Дата обращения (28.04.2018)

45. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 года «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» – Принят Государственной Думой 4 июля 2008 года – Москва.

46. Pat. 5323093 (USA), Int.Cl. H 02 K 23/00. Brushless motor driving device / Kikuchi Atsushi.

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

48. Pat. 5446354 (USA), Int.Cl. H 01 R 39/46. Drive apparatus for brushless dc motor and failure diagnosing method for the same / Hiruma Atsuyuki



49. 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.
50. Konev Yu.I. Microelectronic electrical system. Applications in electronics. Moscow, Radio and Communications Publ., 1987. 240 p.
51. Juferov F M 1988 Electric motors for automatic devices High school 479
52. G. Odnokopylov, I. Odnokopylov RF Patent No. 2007112527, Byull. Izobret., No. 16 (2008).
53. G. Odnokopylov, I. Odnokopylov, Yuri Dementyev RF Patent No. 2460190, Byull. Izobret., No. 24 (2011).
54. 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.
55. G. Odnokopylov, E. Senkiv, Y. Dementyev RF Patent No. 2016132914, Byull. Izobret., (2016).
56. G. Odnokopylov, E. Senkiv, I. Rozaev, Y. Dementyev RF Patent No. 2017105664, Byull. Izobret., (2017).
57. G. Odnokopylov, E. Senkiv, I. Rozaev, Y. Dementyev RF Patent No. 2017105667, Byull. Izobret., (2017).
58. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant induction motor electric drive. Polzunovsky Vestnik. no. 3 (2013): 157-162.
59. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Vector fault tolerant control of asynchronous motor electric drive. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. no. 2 (2013): 327-330.
60. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Principles of providing survivability of asynchronous motor electric drive based on reserve elements. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. no. 4 (2013): 133-137.

61. Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель несимметричного асинхронного двигателя на основе схем замещения для переходных режимов // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 24–30.
62. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.: Изд-во АН СССР, 1968. – 526 С.
63. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике / Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др. Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 С.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2638219

**ГИБРИДНОЕ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО С  
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Однокопылов Георгий Иванович (RU), Дементьев Юрий Николаевич (RU), Сенькив Елена Петровна (RU)*

Заявка № 2016132914

Приоритет изобретения 09 августа 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 декабря 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 августа 2036 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



