

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

<b>Тема работы</b>
«Диагностика повреждений ротора в асинхронном двигателе с короткозамкнутой обмоткой»

УДК 621.313.333.043.3

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Ефименко Ростислав Сергеевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин Вадим Владимирович	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	–		

По разделу на иностранном языке:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ

### 13.04.02 электроэнергетика и электротехника

Код результата	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности.
ПК(У)-2	Способен применять методы создания и анализа математических моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать, реализовывать и осуществлять контроль выполнения технических и организационных мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.
ПК(У)-4	Способен формулировать технические задания, анализировать различные варианты и искать компромиссные решения.
ПК(У)-5	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

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

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
Гарганцев А.Г.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b> <i>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</i>
--

Студенту:

Группа	ФИО
5AM07	Ефименко Ростиславу Сергеевичу

Тема работы:

«Асинхронный частотно – регулируемый электропривод добычи нефти»	
Утверждена приказом директора (номер, дата):	344-50/с 10.12.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2022
--	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><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; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объектом исследования являются асинхронные переменного тока с короткозамкнутым ротором.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Мощность – до 400 кВт;</li> <li>• Питающая сеть: <math>U_n = 380 \text{ В}</math>, <math>f_c = 50 \text{ Гц}</math>.</li> </ul> <p>Обеспечение диагностики повреждения ротора.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <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)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Обзор конструктивных особенностей асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт;</li> <li>• Анализ методов диагностирования повреждений короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей;</li> <li>• Математическое моделирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;</li> <li>• Разработка и тестирование имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в <math>m</math> – фазной системе координат в программной среде Matlab Simulink;</li> <li>• Разработка и моделирование диагностической системы для выявления повреждений в роторной цепи;</li> <li>• Социальная ответственность;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Схема имитационной модели асинхронного двигателя с повреждениями стержней ротора;</li> <li>• Функциональная схема системы диагностики;</li> <li>• Схема имитационной модели системы диагностики;</li> <li>• Вектор огибающей тока статора в различных режимах работы двигателя при обрыве стержней.</li> </ul>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<b>Социальная ответственность</b>	Черемискина Мария Сергеевна
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	Клемашева Елена Игоревна
<b>Раздел на иностранном языке</b>	Воробьева Виктория Владимировна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> Введение; назначение, устройство и принцип работы установки электропривода центробежного насоса; заключение.	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	28.02.2022
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин Вадим Владимирович	к.т.н.		28.02.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Ефименко Ростислав Сергеевич		28.02.2022

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM07	Ефименко Ростиславу Сергеевичу

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

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Проведение предпроектного анализа; Определение целевого рынка и проведение его сегментирования; Выполнение SWOT-анализа проекта.
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	Цели и результат проекта; Организационная структура проекта
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составление календарного плана проекта; Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; Расчет бюджета научно – технического исследования (НТИ) Реестр рисков проекта
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка сравнительной эффективности исследования; Оценка абсолютной эффективности исследования.
<b>Перечень графического материала(с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Матрица-SWOT</li> <li>2. Диаграмма Ганта</li> <li>3. Сегментирование рынка</li> <li>4. График проведения НТИ</li> <li>5. Иерархическая структура работ по проекту</li> </ol>	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон. наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM07	Ефименко Ростислав Сергеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
5AM07		Ефименко Ростислав Сергеевич	
<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа энергетики</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение электроэнергетики и электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/ специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

<b>Диагностика повреждений ротора в асинхронном двигателе с короткозамкнутой обмоткой</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения.</li> </ul>	<p>Объект исследования: методика диагностики повреждений в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором</p> <p>Область применения: установки промышленных предприятий, электростанций.</p> <p>Рабочая зона: офис</p> <p>Размеры помещения: 20м2</p> <p>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: компьютер</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: моделирование в программной среде MATLAB- Simulink</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</li> <li>- ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация</li> <li>- ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</li> <li>- СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда".</li> <li>- ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Недостаточная освещенность рабочей зоны.</li> <li>- Отклонение показателей микроклимата.</li> <li>- Повышение уровня вибрации.</li> <li>- Повышение уровня шума.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Поражение электрическим током.</li> </ul> <p>Расчет системы искусственного освещения.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осветительные приборы;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- светозащитные устройства;</li> <li>- светофильтры;</li> <li>- антивибрационные рукавицы;</li> <li>- антивибрационные сидения;</li> <li>- звукоизолирующие кожухи и экраны;</li> <li>- изолирующие подставки.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения:</b>	<p>Воздействие на литосферу: деградация и уплотнение почвенного покрова (здание и подземные коммуникации)</p> <p>Воздействие на гидросферу: использование водных ресурсов, подведение воды и водоотведение, отопление, мытье рук</p> <p>Воздействие на атмосферу: загрязнения пылью и газами, тепловое загрязнение атмосферного воздуха.</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения:</b>	<p>Возможные ЧС: пожар и взрыв оборудования.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар.</p>
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
<b>28.02.2022</b>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	—		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Ефименко Ростислав Сергеевич		28.02.2022

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники  
 Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.12.2021 г.	Литературный обзор	5
10.02.2022 г.	Анализ методов диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей	10
12.03.2022 г.	Анализ математических моделей в двухфазной и многофазной системе координат	10
21.04.2022 г.	Моделирование двигателя в m – фазной системе координат в Matlab Simulink	20
02.05.2022 г.	Разработка и тестирование диагностической системы	20
15.05.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
20.05.2022 г.	Социальная ответственность	10
25.05.2022 г.	Раздел на английском языке	5
27.05.2022 г.	Оформление результатов работы и выводов по работе. Формирование файла дипломной работы	10
28.05.2022 г.	Итог	100

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин Вадим Владимирович	К.Т.Н.		28.02.2022

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев Александр Георгиевич	Д.Т.Н.		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит: 129 страниц, 31 рисунок, 39 таблиц, 83 источника и 1 приложение.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, диагностика повреждений, обрыв стержня ротора.

Объект исследования: асинхронные электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Цель работы: разработка системы диагностики обрыва стержней беличьей клетки ротора асинхронного двигателя на основе данных токов статора.

В результате работы разработана n-фазная имитационная модель асинхронного двигателя, позволяющая исследовать обрыв стержня в беличьей клетке, позволяющая распознать аварийное состояние двигателя. А также, предложен алгоритм настройки от ложных срабатываний.

Актуальность данной работы обусловлена острой необходимостью в теоретическом обосновании и разработке методов диагностирования сложных внутренних повреждений асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором являющихся одним из главных элементов ответственных механизмов многих технологических процессов. Несмотря на тяжелейшие и, как правило, необратимые последствия, от такого повреждения как дефекты в короткозамкнутой обмотке ротора, защит от данного повреждения не существует и выявляется такое повреждение только в период капитального ремонта. Обрыв стержня ротора в начальной стадии своего развития носит скрытый характер, при этом, режим работы двигателя является аварийным.

Выпускная квалификационная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010. Моделирование производилось в программной среде MatLab Simulink.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

АД – асинхронный двигатель;

КР – короткозамкнутый ротор;

КПД – коэффициент полезного действия;

КИХ – конечная импульсная характеристика.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	13
1 ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ .....	14
1.1 Конструктивные особенности асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт .....	14
1.2 Основные виды неисправностей короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт .....	16
1.3 Предпосылки и обоснование разработки диагностической системы для определения обрыва стержней в роторной цепи .....	19
1.4 Анализ методов диагностирования повреждений короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей .....	20
1.5 Технико-экономический эффект раннего обнаружения дефектов в роторной цепи .....	25
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ .....	28
2.1 Основные допущения при моделировании асинхронных двигателей .....	28
2.2 Математическая модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат .....	31
2.3 Математическая модель асинхронного двигателя в многофазной системе координат ..	36
2.4 Математическое описание трехфазной машины при неподвижном роторе в аналитическом виде .....	42
2.5 Сравнительный анализ математических моделей .....	48
3 СИНТЕЗ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБРЫВА СТЕРЖНЕЙ В РОТОРЕ .....	49
3.1 Разработка и тестирование имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в $m$ – фазной системе координат в программной среде Matlab Simulink .....	49
3.2 Разработка диагностической системы для выявления повреждений в роторной цепи ..	57
3.3 Исследование работы диагностической системы .....	60
3.4 Выводы .....	63
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ .....	64
4.1 Цели проекта .....	64
4.2 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ .....	64
4.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	64
4.2.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	66
4.2.3 SWOT-анализ .....	67
4.2.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	69
4.2.5 Методы коммерциализации .....	71
4.3 Инициация проекта .....	72

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	73
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта .....	73
4.3.2 План проект .....	74
4.4 Бюджет научного исследования.....	76
4.4.1 Основная заработная плата .....	76
4.4.2 Отчисления во внебюджетные фонды .....	77
4.4.3 Накладные расходы.....	78
4.4.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	78
4.5 Организационная структура проекта.....	79
4.5.1 План управления коммуникациями проекта .....	80
4.5.2 Реестр рисков проекта .....	80
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности .....	81
4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования .....	81
4.6.2 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	85
Выводы по разделу «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:.....	88
5 Социальная ответственность.....	89
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения .....	89
5.2 Производственная безопасность при разработке проектного решения .....	91
5.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов .....	92
5.2.2 Расчет системы искусственного освещения.....	97
5.2.3 Анализ опасных факторов.....	100
5.3 Экологическая безопасность при разработке проектного решения .....	101
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	103
Вывод по разделу «социальная ответственность»: .....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	116

## ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели получили большое распространение как в установках промышленных предприятий, так и для собственных нужд электростанций. Более 80% вырабатываемой энергии в стране потребляется данным типом электрических машин, а потребность в них продолжает расти по сей день [1].

С увеличением числа эксплуатируемых машин возрастает и вероятность повреждений элементов двигателей. Использование машин в аварийном состоянии, как правило, приводит к значительным финансовым убыткам, обусловленным непрогнозируемым выходом оборудования из строя, и как следствие простоем рабочих механизмов, расстройству сложного технологического процесса и значительному повышению энергопотребления.

Из наиболее распространенных неисправностей асинхронных электродвигателей является обрыв или ослабление стержней в «Беличьей клетке», что составляет более 80 % всех повреждений обмотки ротора. [2]. Подобные дефекты в настоящее время выявляются только при капитальных ремонтах с полным выводом устройства из работы, но из-за большой периодичности подобных мероприятий, не всегда удается определить неисправность в обмотке ротора своевременно, что приводит к продолжительным работам АД с оборванными стержнями. Несимметричность обмоток ротора проявляется в чрезмерном расходе электрической энергии, причем за год работы, сумма перерасхода электроэнергии может быть сопоставима, а то и превышать стоимость самого двигателя.

Вибродиагностика является основным методом, который позволяет оценить состояние элементов двигателя, но для установки оборудования требуется обеспечить полную остановку двигателя. Таким образом, разработка методов диагностики повреждений ротора в асинхронном двигателе с короткозамкнутой обмоткой без выведения двигателя из эксплуатации - является актуальной задачей на сегодняшний день.

# 1 ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

## 1.1 Конструктивные особенности асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт

Асинхронные двигатели с КР являются приводными механизмами для большого количества промышленных установок благодаря положительным качествам, проверенными эксплуатацией, среди которых выделяют [3-7]:

- а) надежность;
- б) технологичность изготовления;
- в) высокий коэффициент полезного действия;
- г) низкие эксплуатационные затраты;
- д) ремонтпригодность;
- е) способность выдерживать кратковременные механические перегрузки;
- ж) низкая стоимость относительно двигателей с фазными роторами.

Весомым фактором при выборе АД является и отсутствие дорогостоящих постоянных магнитов.

Асинхронные двигатели имеют две основные части: неподвижный статор и вращающийся внутри него ротор, соединенный валом с рабочими агрегатами насосов, турбин и конвейеров [8].

Конструкция статора АД содержит магнитопровод, трехфазную обмотку, подключаемую к сети переменного тока, и станину, рисунок 1. Магнитопровод из изолированных лаком пластин и обмотка являются активными элементами статора, которые образуют вращающееся магнитное поле. Кольцеобразные пластины имеют на внутренней стороне полузакрытые пазы, в которые укладывается обмотка статора с целью уменьшения добавочных потерь и пульсаций. В крупных асинхронных двигателях применяют шаблонные катушечные или стержневые обмотки, уложенные в открытые пазы [3].

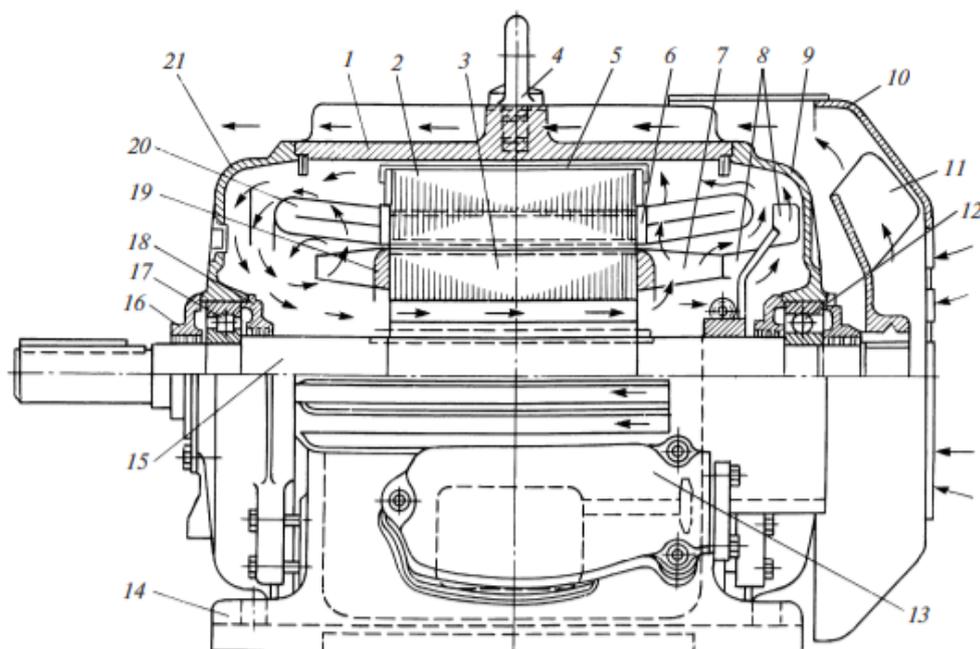


Рисунок 1 – АД с короткозамкнутым ротором мощностью 55 кВт:

1 – станина; 2, 3 – магнитопровод; 4 – подъемная рама; 5 – стяжная скоба; 6 – натяжное кольцо; 7, 8, 11 – вентиляторы; 9, 21 – подшипниковый щит; 10 – защитный кожух; 12, 17 – подшипники качения; 13 – выводная коробка; 14 – крепежная лапа; 15 – вал; 16, 18 – крышка подшипника; 19 - короткозамкнутая обмотка ; 20 – обмотка статора

Короткозамкнутый ротор состоит из двух активных элементов – магнитопровода, и размещенной внутри первого многофазной обмоткой. Остальные детали имеют только конструктивное назначение, например: вентиляторы предназначены для циркуляции воздуха и охлаждения; вал - передает механическую энергию к исполнительной машине [3].

Для асинхронных двигателей мощностью до 400кВт, магнитопровод ротора изготавливают из цельных кольцевых пластин электротехнической стали, спрессованных на сдерживающей оправке. Короткозамкнутую обмотку изготавливают путем заливки алюминия в пазы ротора без дополнительной изоляции, при этом, замыкающие кольца отливаются как одно целое со стержнями. Благодаря данной конструкции, отсутствует потребность в дополнительных прессующих элементах, удерживающих пластины магнитопровода в осевом направлении.

Такой способ изготовления короткозамкнутых роторов является наиболее технологичным, и обеспечивает хороший контакт стержней с кольцами. Но одновременно с этим, процесс заливки осложнен резкими переходами от тонких стержней к толстым кольцам и способностью расплавленного алюминия к активному окислению, в процессе которого, в пазы и кольца попадает окисная пленка, что может привести к трещинам, неполной заливке или обрывам стержней при остывании металла [9].

## **1.2 Основные виды неисправностей короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт**

При эксплуатации асинхронных двигателей достаточно часто встречаются повреждения беличьей клетки. Обрыв стержней обычно происходит в пазовой части или на выступающей части активной стали (отрыв от замыкающего кольца, обрыв на выходе из паза), рисунок 2 [10-14].



Рисунок 2 – Обрыв стержней обмотки ротора двигателя АНЗ-4-16-45-10

Наиболее неблагоприятный исход влечет обрыв выступающего стержня, при котором под действием центробежной силы, оторванный конец отгибается и прорезает обмотку высокого напряжения статора, что приводит к сложному и дорогостоящему ремонту, рисунок 3 [11].



Рисунок 3 – Повреждение обмотки статора двигателя АНЗ-4-16-45-10 из-за обрыва стержней обмотки ротора

Нарушение работы короткозамкнутой обмотки может быть вызвано трещинами стержней. В большинстве случаев, это влечет к разрывам, но иногда, двигатель может проработать с лопнувшими стержнями продолжительное время, что весьма нежелательно. Обнаружить подобный дефект на месте эксплуатации не всегда предоставляется возможным и как следствие, это приводит к аварийному выходу двигателя из строя в самый неподходящий для производственного процесса момент.

Места соединения стержней и колец нередко подвержены распайкам, которые обусловлены нарушениями в процессе производственной пайки. Стоит отметить, что при правильно выполненных работах – этот узел является довольно крепким [13].

Реже встречаются разрывы короткозамыкающих колец от действия таких факторов, как: динамические напряжения; центробежные силы; высокие температуры; механические перенапряжения [14].

Кроме упомянутых выше, существуют и другие неисправности, которые приводят к обрыву стержней, распайке или полному выходу АД из строя. К таким дефектам можно отнести:

- а) смещение беличьей клетки (рисунок 4, а);
- б) горбообразный прогиб выступающих концов стержней (рисунок 4, б);

в) изгиб стержней в направлении вращения, вызванное усилием скручивания в роторах с массивными короткозамыкающими кольцами (рисунок 4, в);

г) волнообразный изгиб колец от несимметричного удлинения стержней (рисунок 4, г) [10].

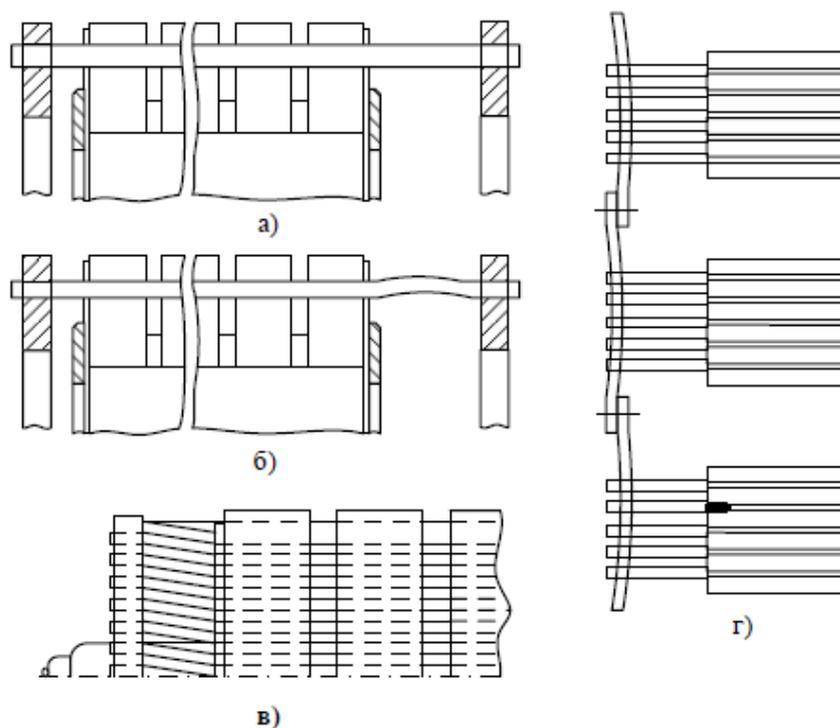


Рисунок 4 – Виды повреждений беличьих клеток.

Реальным примером последствий при повреждении обмоток ротора является описанный в [15] случай отказа электропривода молотковой дробилки, произошедший на одной из ТЭЦ в городе Иванова.

Осмотр машины показал:

- 1) обрыв дух стержней со стороны вала в местах спайки с кольцом и еще двух стержней с обеих сторон
- 2) поломка зубцов полузакрытых пазов. При этом, зубцы первого паза сломаны на половину длины сердечника и выгнуты в сторону воздушного зазора;
- 3) в верхней части обмотки статора наблюдается выгорание трех секций изоляции;
- 4) повреждение изоляции внутренней обмотки статора в местах выхода из пазов по всей окружности со стороны механизма;

5) на стержнях трех верхних секций отмечаются следы короткого замыкания;

б) лобовая часть одной секции обмотки статора сильно погнута в месте выхода из паза в сторону направления вращения ротора;

Стоимость замены вышедшей из строя машины составила порядка трех с половиной миллиона рублей, а стоимость ремонта практически восемьсот тысяч рублей на 2009 год. Таким образом, при своевременной диагностики неисправности, предприятию бы потребовался небольшой ремонт обмотки ротора, осуществимый своими силами.

### **1.3 Предпосылки и обоснование разработки диагностической системы для определения обрыва стержней в роторной цепи**

Как было обосновано в [16] и в разделе 1.2 данной работы, основными повреждениями короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей являются обрывы стержней и разрывы короткозамыкающих колец.

На обрывы стержней приходится около 80 % всех повреждений короткозамкнутых роторов [1].

В [17-18] приведены данные интенсивности отказов, полученные при исследовании работы асинхронных машин нескольких ТЭС, таблица 1.

Таблица 1 – Удельная повреждаемость обмотки ротора мельниц и дробилок в АД 6 кВ

Тип двигателя	Механизм	Интенсивность отказов, раз/год
ДАМСО 157–8	Мельница	0,1
ДАЗО 15–49–8	Мельница	0,091
ДАЗО 15–49–8	Дробилка	0,62
АНЗ 2–17–57–12	Дробилка	0,334
ДАЗО 15–69–10	Дробилка	0,91
АНЗ 4–65–45–10	Дробилка	0,584

Обрывы стержней встречаются не только на двигателях с тяжелым пуском, таблицы 2 [19-20] и таблица 3 [21].

Таблица 1.2 – Удельная повреждаемость обмоток роторов асинхронных двигателей по узлам СН

Механизм	Интенсивность отказов раз/год
Мельничный вентилятор	0,077
ПЭН	0,039
Циркуляционный насос	0,058
Дымосос	0,077

Таблица 1.3 – Удельная повреждаемость обмоток роторов асинхронных двигателей по узлам СН

Тип двигателя	Механизм	Интенсивность отказов раз/год
AP 500	Бустерный питательный насос.	0,00385
A 112-4	Насос пускового эжектора.	0,0129
ДАЗО 13-50-4	Мельничный вентилятор.	0,0038

Приведенные показатели повреждаемости обмоток АД различных типов подтверждают необходимость в разработке систем определения обрывов стержней в цепи ротора без выведения двигателя из строя.

В свою очередь, диагностика повреждения ставит задачи по обнаружению места возникновения дефекта, идентификации его вида и оценки степени развития. Основной целью является выявление неисправности на ранней стадии, пока она не оказывает на работоспособность машины существенного воздействия, а также не допустить ее глубокого развития.

#### **1.4 Анализ методов диагностирования повреждений короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей**

На сегодняшний день существуют способы и устройства, помогающие диагностировать состояние стержней в двигателях с КР. Их можно разделить на три группы:

1. Способ ремонтного контроля, осуществляемый при извлечении короткозамкнутого ротора на полностью остановленной машине [22-29].

2. Способы и устройства тестовой диагностики. На асинхронный двигатель подается тестовое воздействие, которое формируется режимами АД или системой диагностирования [30-35].

3. Способы и устройства функциональной диагностики. Осуществление контроля без выведения машины из эксплуатации во время нормальной работы [36-47].

При ремонтных работах с разбором двигателя производятся следующие меры диагностирования:

1. Визуальный контроль, при котором невооруженным глазом видны признаки повреждения: разрывы; трещины; следы побежалости на стержнях и в пазах [16, 18].

2. Акустическая диагностика. Дефект выявляется при ударе по наружной части исправного и неисправного стержня с последующим сравнением звуковых тональностей [16, 18].

3. Контроль микроомметром. На поврежденном стержне наблюдается резкое изменение сопротивления [19].

4. Измерение величины потока рассеяния. Диагностика производится по наводимой током стержня величине магнитного потока рассеяния, резкое уменьшение которой, свидетельствует о повреждении. Наиболее часто применяются способы с использованием индуктивных датчиков на подковообразных магнитах [16-18, 21, 29].

Недостатками методов ремонтного диагностирования является отсутствие возможности контроля состояния обмоток в рабочих режимах, а также обнаружения неисправности на раннем этапе ее развития.

Тестовая диагностика - основывается на искусственно созданном режиме или режиме пуска [17, 31-35]. На данный момент существуют следующие способы тестирования [48-50]:

1. Подключение двух фаз асинхронной машины к источнику переменного напряжения с контролем тока при помощи шлейфового

осциллографа. Таким образом, при обрыве будут наблюдаться токовые пики [51].

2. Измерение колебания тока статора с частотой, равной частоте скольжения, в процессе отключения одной фазы статора от сети и замыкании двух других на добавочные сопротивления при холостом ходе двигателя [31].

3. Контроль в режиме короткого замыкания (при неподвижном роторе), по внешнему электромагнитному полю. На корпусе асинхронного двигателя размещают измерительную магнитную систему с многополюсными намагничивающими и двухполюсными измерительными обмотками, которая измеряет магнитный диполь внешнего электромагнитного поля. При возникновении обрыва, величина магнитного диполя значительно увеличивается в то время, как у симметричной обмотки он практически равен нулю [33].

К достоинствам данных способов можно отнести: способность выявления обрыва одного стержня; не имеют потребности в установке датчиков внутри двигателя; возможность диагностирования пусковой обмотки.

Недостатками являются: непригодность методов для двухполюсных АД; сложная контрольно-измерительная система.

4. Контроль высокочастотной составляющей электромагнитного поля вокруг обмотки ротора, наведенной высокочастотными токами (от 10кГц) в дуге, между контактами поврежденного стержня. В расположенном вблизи лобовой части статора датчике, при обрыве стержней, наводится высокочастотное ЭДС, амплитуда которой модулируется низкочастотным сигналом с удвоением частоты тока в роторе [37-38, 48].

Достоинствами способа являются: возможность проводить измерения как в нормальных режимах работы, так и при переходных процессах; хорошая чувствительность при пуске; пригодность для пусковой обмотки; обнаружение обрыва одного стержня.

К недостаткам способа относят: измерения проводятся в основном при пуске АД; установки датчика внутри двигателя; низкая достоверность.

5. Измерение величин пульсаций фазного тока статора в пусковом режиме. Амплитуды этих составляющих зависят только от параметров АД и превышают номинальный ток в 5-7 раз [49-50].

Достоинства: способ применим для с двойной «беличьей клеткой»; хорошая достоверность данных в пусковом режиме.

Недостатками являются: диагностирование только при пуске; непригодность способа для АД с временем пуска менее 2,5 с; отсутствие критериев перехода из исправного состояния в нерабочее.

Функциональная диагностика основана на исследовании сигналов, измеренных в нормальном режиме работы двигателя. В методе используются прямые или косвенные измерения с последующим анализом параметров работающего электродвигателя и окружающих его физических полей.

Сегодня, существующие методы такой диагностики роторов можно разделить на способы:

- а) с использованием датчиков снаружи АД;
- б) с установкой датчика внутрь асинхронного двигателя;
- в) с использованием трансформаторов тока в качестве источников информации.

В источнике [36] описан способ, при котором измерение величины магнитного потока, наводимого от стержней, вдоль периметра ротора производится с помощью устройства [39], фиксирующего выходные сигналы от электромагнитного датчика в статоре и от наружного датчика оборотов двигателя.

Достоинствами являются: способность обнаружения одного стержня; измерение производится в стационарном рабочем режиме; имеет критерии перехода из исправного состояния в поврежденное.

К недостаткам относятся: установка датчика внутри двигателя; слабая защита полезного сигнала от помех и его искажение фильтрами, используемыми в устройстве; низкая достоверность.

Способ [52-53] описывает несимметрию магнитного поля при обрыве стержней, при которой проявляется вибрация корпуса и ротора. Диагностирование предполагается проводить по определенному спектру частот, так как вибрация может зависеть от приводного механизма и износа подшипников, при помощи обработки спектра. На ЭВМ выделяют только полезную часть, связанную с повреждением ротора.

Достоинства: измерение в стационарном режиме без установки датчиков внутрь двигателя.

Недостатки: не имеет четких критериев перехода из исправного состояния в нерабочее, низкая достоверность.

Одним из методов функциональной диагностики является анализ сигнала отклонения скольжения двигателя при определенной нагрузке с использованием датчика на валу. С обрывом стержня увеличивается активное сопротивление АД, что в свою очередь, приводит к уменьшению КПД обмотки ротора, равному примерно равно  $\eta \approx 1 - s$ , где  $s$  – скольжение АД. Следовательно - скольжение будет увеличиваться [54].

Достоинства способа: измерение в стационарном режиме; не требует установки датчиков внутри двигателя.

Недостатки: низкая достоверность в связи с методологической погрешностью.

В качестве датчиков, возможно использование трансформаторов тока, которые устанавливаются в фазах обмотки статора двигателя, при этом, диагностическим признаком будет являться резкое увеличение амплитуды пульсаций определенных токов поврежденного стержня, возникающие из-за токов обратной последовательности в обмотке ротора [3-4].

Методы диагностики, основанные на контроле амплитуды пульсаций фазного тока обмотки статора с частотой скольжения ротора, не требуют установки дополнительных датчиков в АД. В качестве диагностического аппарата используют трансформатор тока, подключенный к фазам обмоток статора, что позволяет проводить измерения в стационарном режиме [56].

К недостаткам можно отнести: низкая достоверность данных в результате возникновения пульсаций при переменной нагрузке; непригодность для асинхронных машин с двойной «беличьей клеткой», имеющих низкую величину пульсаций.

В настоящее время наиболее известные средства диагностики обрыва в короткозамкнутом роторе так и не нашли широкого применения, поскольку разработанные устройства и системы не имеют четких диагностических критериев, а также, имеют низкую чувствительность при обрыве одного стержня.

### **1.5 Технико-экономический эффект раннего обнаружения дефектов в роторной цепи**

На сегодняшний день, наблюдается возрастание потребности ремонтных работ и плановых технических обслуживаний АД с короткозамкнутыми роторами. Это напрямую связано с общим увеличением числа эксплуатируемых машин, и сроков службы, а как следствие – устареванию двигателей на производствах.

Неисправности в беличьих клетках сложно определить как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Вместе с этим, они составляют свыше 10% всех повреждений асинхронных машин. В работе двигателя с дефектом короткозамкнутой обмотки происходит повышение токов в статоре и увеличение вибраций, что в свою очередь приводит к преждевременному износу подшипников, обмотки статора и др. [26].

Своевременная и достоверная диагностика необходима для поддержания высокого уровня надежности АД. Поэтому к системам технического контроля и методам обнаружения дефектов предъявляют высокие требования.

Основной ущерб, при эксплуатации асинхронных двигателей с асимметрией обмоток ротора, заключается в перерасходе электроэнергии, сумма

которого, за год может превышать стоимость нового АД. Оценку повышенного энергопотребления производят при помощи методики описанной в [3].

Активные и реактивные электрические потери в фазах обмотки ротора:

$$P = R_r \cdot I_r^2, Q = X_r \cdot I_r^2,$$

где  $I_r$  - ток фазы ротора, равный току в соответствующем участке короткозамыкающего кольца,  $R_r$  и  $X_r$  - активные и реактивные эквивалентные сопротивления фаз короткозамкнутой обмотки.

Исходя из энергетических соображений, суммарные потери в фазах обмотки должна быть равны сумме потерь в стержнях и элементах кольца. Таким образом потери одной фазы ротора составят:

$$P = R_r \cdot I_r^2 = R_{rst} \cdot I_{st}^2 + 2 \cdot R_{rkl} \cdot I_{kl}^2, Q = X_r \cdot I_r^2 = X_{rst} \cdot I_{st}^2 + 2 \cdot X_{rkl} \cdot I_{kl}^2,$$

где  $R_{rst}$  ( $R_{rkl}$ ) и  $X_{rst}$  ( $X_{rkl}$ ) - активные и реактивные сопротивления стержня (участка кольца) ротора,  $I_{st}$  и  $I_{kl}$  - токи в стержне и участке кольца.

Общие электрические потери в короткозамкнутой обмотке определяются как сумма потерь всех фаз ротора:

$$\sum_{i=1}^{z_2} R_{ri} \cdot I_{ri}^2 = \sum_{i=1}^{z_2} R_{rsti} \cdot I_{sti}^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{z_2} R_{rkli} \cdot I_{kli}^2;$$

$$\sum_{i=1}^{z_2} X_{ri} \cdot I_{ri}^2 = \sum_{i=1}^{z_2} X_{rsti} \cdot I_{sti}^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{z_2} X_{rkli} \cdot I_{kli}^2$$

где  $z_2$  - число фаз короткозамкнутой обмотки, равное числу ее стержней.

В таблице 4 представлены расчеты токов и энергетических показателей двигателя АО-31-4 [56].

Таблица 4 – Энергетические показатели АД при повреждении ротора

Режим работы	Ток фазы, А	cosφ, отн. ед.	Потребляемая мощность Р, кВт.
Без повреждения	5,3566	0,8287	2,936
При повреждении одного стержня	5,4655	0,8327	2,998
При повреждении двух стержней	5,6626	0,8374	3,135
При повреждении трех стержней	5,8284	0,8386	3,241

Полученные результаты показывают, что при неисправности одного или нескольких стержней фазный ток возрастает на 1,995% (при обрыве одного стержня), 5,674% (при обрыве двух стержней) и 8,806% (при обрыве трех),  $\cos\phi$  повышается на 0,484 %, 1,051 % и 1,414 % соответственно. Потребление электроэнергии увеличивается на 2,47 %, 6,78 % и 10,36 %.

Увеличение затрат на эксплуатацию неисправного асинхронного двигателя рассчитывается как:

$$\Delta Z_{\text{ЭЭ}} = \Delta P \cdot n_2 \cdot C_{\text{ЭЭ}},$$

где  $\Delta P = P^* - P$  - разность в потреблении мощности между АД с целыми и поврежденными стержнями в кВт;  $n_2$  - число часов работы двигателя в год ( $n_2 = 8760ч$  при непрерывном производстве);  $C_{\text{ЭЭ}}$  - цена электроэнергии по тарифу.

Результаты расчета дополнительных затрат на перерасход электрической энергии приведены в таблице 5 [57].

Таблица 5 – Энергетические показатели АД при повреждении ротора

Тип двигателя	Потребляемая мощность, кВт	Стоимость двигателя, руб.	Дополнительные затраты на электрическую энергию в рублях при обрыве.		
			одного стержня	двух стержней	Трех стержней
АО 31-4	2,7	400-800	232,3	447,9	616
AZM 8000/6000	8000	2-3 млн.	122723	853733,5	1291032,7

Полученные данные показывают, что годовые потери электроэнергии, при эксплуатации двигателя с поврежденной короткозамкнутой обмоткой, могут быть сопоставимы со стоимостью самого АД. Исходя из этого следует, что разработка систем диагностики является актуальной задачей на сегодняшний день и имеет существенный технико-экономический эффект, обусловленный суммой предотвращенного ущерба.

## **2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

### **2.1 Основные допущения при моделировании асинхронных двигателей**

Асинхронный двигатель является сложной электромеханической системой, в которой все происходящие процессы взаимосвязаны. Учет всех сложных взаимосвязей при исследовании АД с повреждением короткозамкнутой обмотки ротора приводит к необходимости разработки математической модели АД, способной учесть несимметричные аварийные и нормальные режимы работы.

В математической модели АД принимаются следующие допущения:

- не учитываются потери в стали, вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе двигателя и его перемагничиванием;
- не учитывается насыщение магнитной цепи АД;
- энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре;
- воздушный зазор равномерен;
- пренебрегается эффектом вытеснения токов в проводниках ротора;
- напряжения фаз синусоидальны;
- питающая сеть – идеальная.

### **2.3. Математическая модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат**

Современные способы моделирования асинхронных электродвигателей базируются на представлении трехфазного асинхронного электродвигателя двухфазной электрической машиной. Это значительно упрощает его математическое описание и дальнейший расчет.

На рисунке 5 приведена схема трехфазного асинхронного двигателя. Обмотки фаз трехфазного двигателя сдвинуты на 120 электрических градусов

относительно друг друга. Трехфазная система обмоток статора расположена со сдвигом на  $\frac{120}{z_p}$  угловых градусов по окружности неподвижного статора, где  $z_p$  - число пар полюсов машины. Следовательно, для многополюсного двигателя приведенная на рисунке 5 схема будет соответствовать угловому сектору статора в  $\frac{360}{z_p}$  угловых градусов [58].

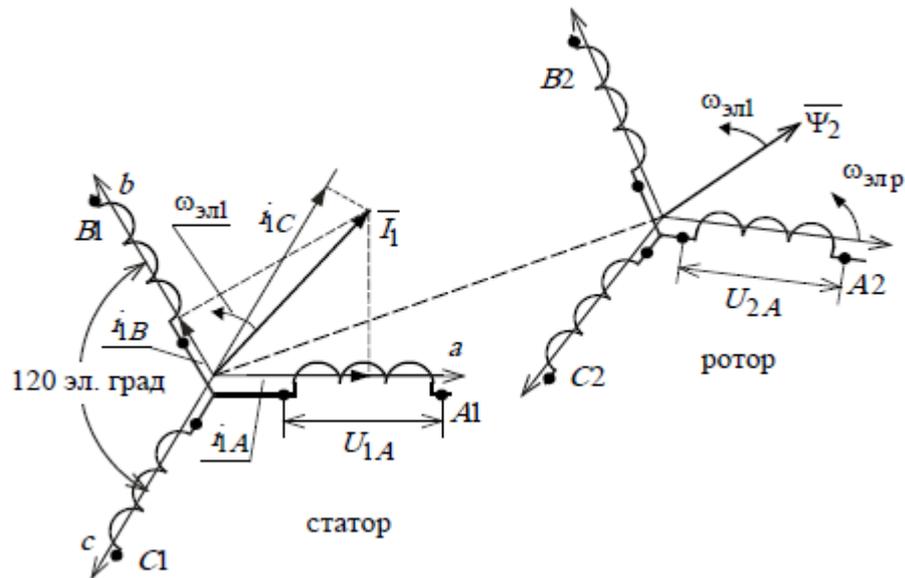


Рисунок 5 – Схема трехфазного асинхронного двигателя

В симметричной машине с идеальными обмотками при питании их симметричными напряжениями  $U_{1A}$ ,  $U_{1B}$  и  $U_{1C}$  с угловой частотой  $\omega_{эл1}$  токами обмоток создается вращающееся магнитное поле той же частоты с постоянной амплитудой намагничивающей силы [59]. Вращающуюся намагничивающую силу можно представить вращающимся пространственным вектором  $\vec{I}_1$ , который определяется мгновенными значениями фазных токов  $i_{1A}$ ,  $i_{1B}$  и  $i_{1C}$  [58]:

$$\vec{I}_1 = \frac{2}{3}(i_{1A} + i_{1B} e^{j2\pi/3} + i_{1C} e^{j4\pi/3}).$$

Следует заметить, что вектор  $\vec{I}_1$  не является суммой векторов фазных токов, сумма которых равна  $\frac{2}{3}\vec{I}_1$ .

Вектор  $\vec{I}_1$  вращается относительно неподвижного статора с угловой частотой поля:

$$\omega = 2\pi f_1, \frac{\text{эл.рад}}{c},$$

где  $f_1$  - частота питающего напряжения, Гц;

Ротор электродвигателя вращается с угловой скоростью:

$$\omega = (1-s)\omega_0, \frac{\text{эл.рад}}{c},$$

где  $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{z_p} = \frac{\omega_{\text{эл1}}}{z_p}$  - скорость идеального холостого хода (синхронная)

электродвигателя,  $\frac{\text{угл.рад}}{c}$ ;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - скольжение, о. е.

Скорость ротора в установившемся режиме определяется механической характеристикой двигателя  $M(s)$  и зависит от величины статического момента нагрузки. Один полный оборот ротора соответствует  $z_p$  периодам поля статора. Тогда электрическая частота вращения ротора:

$$\omega_{\text{эл.р}} = z_p \omega = (1-s)\omega_{\text{эл1}}, \frac{\text{эл.рад}}{c},$$

Следствием отличия электрической скорости ротора от угловой частоты поля статора:

$$\Delta\omega_{\text{эл.р}} = \omega_{\text{эл1}} - \omega_{\text{эл.р}}$$

является наводимая в обмотках ротора ЭДС с угловой частотой:

$$\omega_{\text{эл2}} = \omega_{\text{эл.р}}, \frac{\text{эл.рад}}{c}$$

или, соответственно:

$$f_2 = \frac{\Delta\omega_{\text{эл.р}}}{2\pi}, \text{Гц.}$$

В результате вектор потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}_2$  вращается с угловой частотой относительно вращающегося ротора:

$$\omega_{\text{эл2}} = z_p (\omega_0 - \omega) = 2\pi f_1 - z_p \omega, \frac{\text{эл.рад}}{c},$$

а относительно неподвижного статора с результирующей угловой скоростью:

$$\omega_{эл.р} + \omega_{эл2} = \omega_{эл1} = 2\pi f_1, \frac{эл.рад}{с}.$$

Векторы тока статора  $\vec{I}_1$  и потокосцепления ротора  $\vec{\Psi}_2$  вращаются синхронно, но их относительное положение определяется некоторым углом, который при работе электродвигателя не остается постоянным.

## **2.2 Математическая модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат**

Динамика трехфазного асинхронного электродвигателя в трехкоординатной системе, жестко связанной со статором, описывается шестью уравнениями электрического равновесия в цепях обмоток статора и ротора, уравнением электромеханического преобразования энергии и уравнением механического движения. Для упрощения математического описания и анализа процессов в трехфазном электродвигателе его заменяют эквивалентной двухфазной моделью, а затем путем выбора общей системы координат и линейных преобразований исходной системы уравнений осуществляют замену действительных переменных новыми переменными при условии сохранения адекватности математического описания физическому объекту. Новые переменные связаны с реальными переменными формулами прямого и обратного преобразования.

На рисунке 6 приведена схема двухфазного асинхронного двигателя. Две обмотки статора расположены со сдвигом на 90 эл. градусов по окружности неподвижного статора и запитываются одна синусоидальным, а другая - косинусоидальным по форме переменными напряжениями.

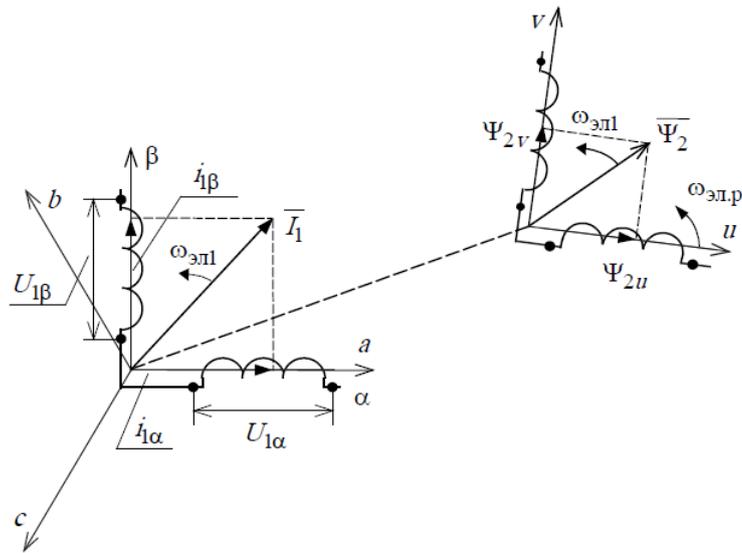


Рисунок 6 – Схема двухфазного асинхронного двигателя

Неподвижная, жестко связанная со статором координатная система  $\alpha, \beta$  выбирается так, чтобы ее ось  $\alpha$  совпадала с осью  $a$  координатной системы  $a, b, c$  трехфазного статора. Тогда проекции вектора тока статора  $\vec{I}_1$  на оси  $\alpha$  и  $\beta$  будут определять фазные токи двухфазной обмотки статора  $I_\alpha$  и  $I_\beta$ . Выражения для преобразования фазных токов трехфазной обмотки статора в фазные токи эквивалентной двухфазной обмотки статора имеют вид:

— прямое преобразование:

$$I_{1\alpha} = i_{1A}; \quad I_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{1A} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_{1B} = \frac{i_{1B} - i_{1A}}{\sqrt{3}};$$

— обратное преобразование:

$$i_{1A} = I_{1\alpha}; \quad i_{1B} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}; \quad i_{1C} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}.$$

После приведения роторных переменных к неподвижной статорной системе координат  $\alpha, \beta$  уравнения напряжений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{1\alpha\beta}; \\ 0 &= R'_2 \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} - j\omega_{эл.р} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $R'_2$  - приведенное к статору сопротивление обмотки ротора.

Векторы результирующего потокоцепления в любой системе координат:

$$\vec{\Psi}_1 = L_1 \cdot \vec{I}_1 + L_m \cdot \vec{I}_2; \quad (2.2)$$

$$\vec{\Psi}_2 = L_2 \cdot \vec{I}_2 + L_m \cdot \vec{I}_1. \quad (2.3)$$

где  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  - эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;

$L_2 = L'_{2\sigma} + L_m$  - эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн;

$L_{1\sigma}$  - индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;

$L'_{2\sigma}$  - приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн;

$L_m$  - результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком

в воздушном зазоре машины, Гн.

С учетом уравнений (2.2) – (2.3) система (2.1) может быть представлена в векторной форме записи:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_1 \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta}; \\ 0 &= R'_2 \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_2 \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} - j\omega_{эл.p} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Во многих случаях выполнять анализ, а особенно синтез систем управления асинхронным двигателем, используя векторное представление переменных, оказывается неудобным. Поэтому от векторов напряжений, токов и потокосцеплений переходят к их представлению через проекции на соответствующие оси ортогональной системы координат:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{1\alpha\beta} &= U_{1\alpha} + jU_{1\beta}; \\ \vec{\Psi}_{1\alpha\beta} &= \Psi_{1\alpha} + j\Psi_{1\beta}; \\ \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} &= \Psi_{2\alpha} + j\Psi_{2\beta}; \\ \vec{I}_{1\alpha\beta} &= I_{1\alpha} + jI_{1\beta}; \\ \vec{I}_{2\alpha\beta} &= I_{2\alpha} + jI_{2\beta}. \end{aligned}$$

Тогда система (2.4) принимает вид:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= R_1 \cdot I_{1\alpha} + L_1 \cdot p \cdot I_{1\alpha} + L_m \cdot p \cdot I_{2\alpha}; \\ U_{1\beta} &= R_1 \cdot I_{1\beta} + L_1 \cdot p \cdot I_{1\beta} + L_m \cdot p \cdot I_{2\beta}; \\ 0 &= R'_2 \cdot I_{2\alpha} + L_2 \cdot p \cdot I_{2\alpha} + L_m \cdot p \cdot I_{1\alpha} + \omega_{эл.p} \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 &= R'_2 \cdot I_{2\beta} + L_2 \cdot p \cdot I_{2\beta} + L_m \cdot p \cdot I_{1\beta} - \omega_{эл.p} \cdot \Psi_{2\alpha}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

В уравнениях цепей с гармоническими входными воздействиями частоты  $\omega_{эл1}$  в установившемся режиме оператор  $p$  может быть заменен на  $j\omega_{эл1}$  [60].

Тогда система уравнений (2.4) в установившемся режиме работы при постоянной скорости двигателя ( $\omega_{\text{эл.п}} = z_p \omega = \text{const}$ ) приводится к виду:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + j\omega_{\text{эл.п}} \cdot L_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + j\omega_{\text{эл.п}} L_m \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta}; \\ 0 &= \frac{R'_2}{s} \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + j\omega_{\text{эл.п}} \cdot L_2 \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_m \cdot j\omega_{\text{эл.п}} \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

При постоянной скорости вращения двигателя  $\omega = \text{const}$  векторы напряжений, токов и потокосцеплений (статора и ротора) в установившемся режиме будут вращаться синхронно с полем статора со скоростью  $\omega_{\text{эл.п}} = 2\pi f_1$  и иметь постоянные амплитуды, а их проекции на оси статорной системы координат  $\alpha$  и  $\beta$  будут представлять собой синусоидальные зависимости с частотой  $f_1$ .

Система уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ , получена на основе уравнений (2.1) - (2.3) и имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_2}{\sigma L_1} \cdot I_{1\alpha} + \frac{R'_2 L_m}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ &+ \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_2}{\sigma L_1} \cdot I_{1\beta} + \frac{R'_2 L_m}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \\ &+ \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 L_m}{L_2} \cdot I_{1\alpha} - z_p \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R'_2 L_m}{L_2} \cdot I_{1\beta} + z_p \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p (\Psi_{2\alpha} I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} I_{1\alpha}); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (M_{\text{эм}} - M_c). \end{aligned} \right. \quad (2.7)$$

где:

$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi f_1 t) = \sqrt{2} U_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t)$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\alpha$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$ , В;

$U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi f_1) = \sqrt{2}U_1 \cdot \cos(2\pi f_1)$  – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\beta$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$ , В;

$U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$  – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, В;

$U_1$  – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В;

$f_1$  – частота напряжения статора, Гц;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$  – составляющие тока статора в системе координат  $\alpha, \beta$ , А;

$\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$  – составляющие потокосцепления ротора в системе координат  $\alpha, \beta$ , Вб;

$M_{эм}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

$M_c$  – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$  – коэффициент рассеяния;

$J$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>.

В операторной форме записи система уравнений (2.7) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_s(T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R'_2 L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_s(T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R'_2 L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R'_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_m I_{1\beta} - \frac{L_2}{R'_2} \cdot z_p \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p (\Psi_{2\alpha} I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} (M_{эм} - M_c). \end{array} \right. \quad (2.8)$$

где  $R_s = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$ ;  $T_s = \frac{\sigma L_1}{R_s}$ ;  $T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$ .

Уравнениям системы (2.8) соответствует структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$ , приведенная на рисунке 7.

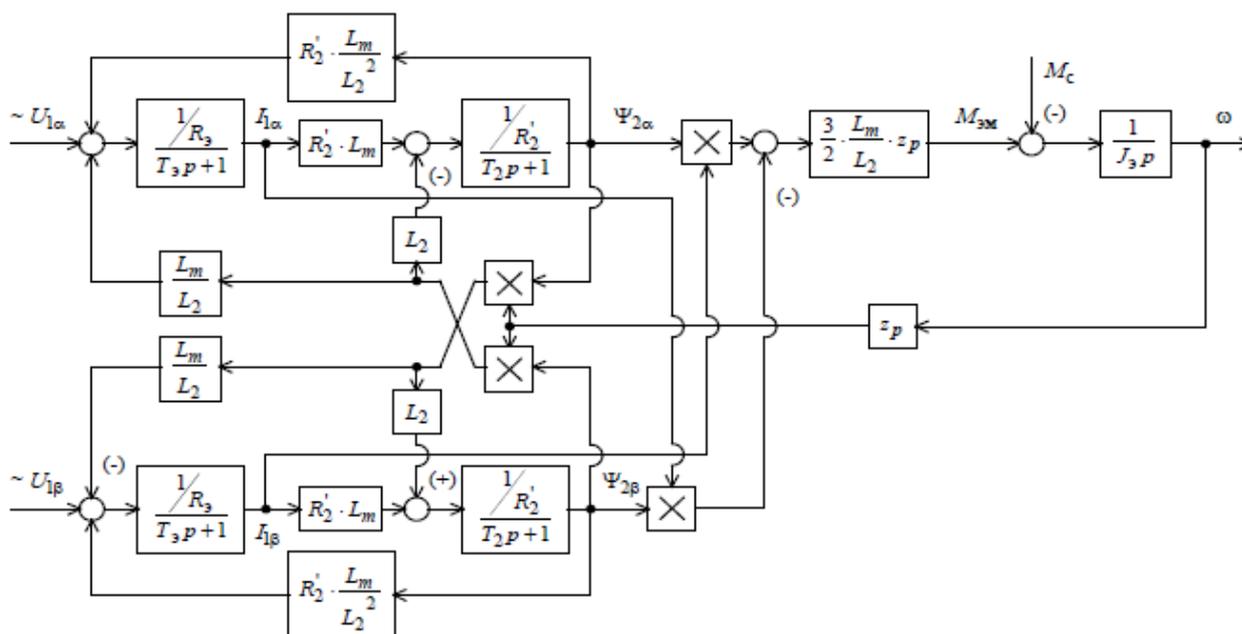


Рисунок 7 – Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$

### 2.3 Математическая модель асинхронного двигателя в многофазной системе координат

Для исследования обрыва стержней в роторе необходима математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, которая должна удовлетворять ряду требований: возможность задавать количество стержней в роторе, описывать адекватно процессы, возникающие в электрической машине, при нормальном и аварийном состоянии.

Рассмотрим описание электрической машины в  $n$ -фазной системе координат, где  $n$  – соответствует общему количеству стержней в роторе. Процессы в роторе и статоре будем описывать в системе координат с одинаковой размерностью.

Асинхронный электродвигатель можно представить в виде эквивалентной многоконтурной схемы замещения, где каждый контур имеет свое активное сопротивление, индуктивности рассеяния и взаимную. Изменяя соответствующее сопротивление  $R_R^{(l)}$  в контуре ротора, можно моделировать повреждение стержня (рисунок 8). При рассмотрении  $n$ -фазной машины было сделано допущение, которое позволяет упростить математическое описание и не учитывать сопротивление контактных колец стержней ротора  $R_e$  и их индуктивность  $L_e$ .

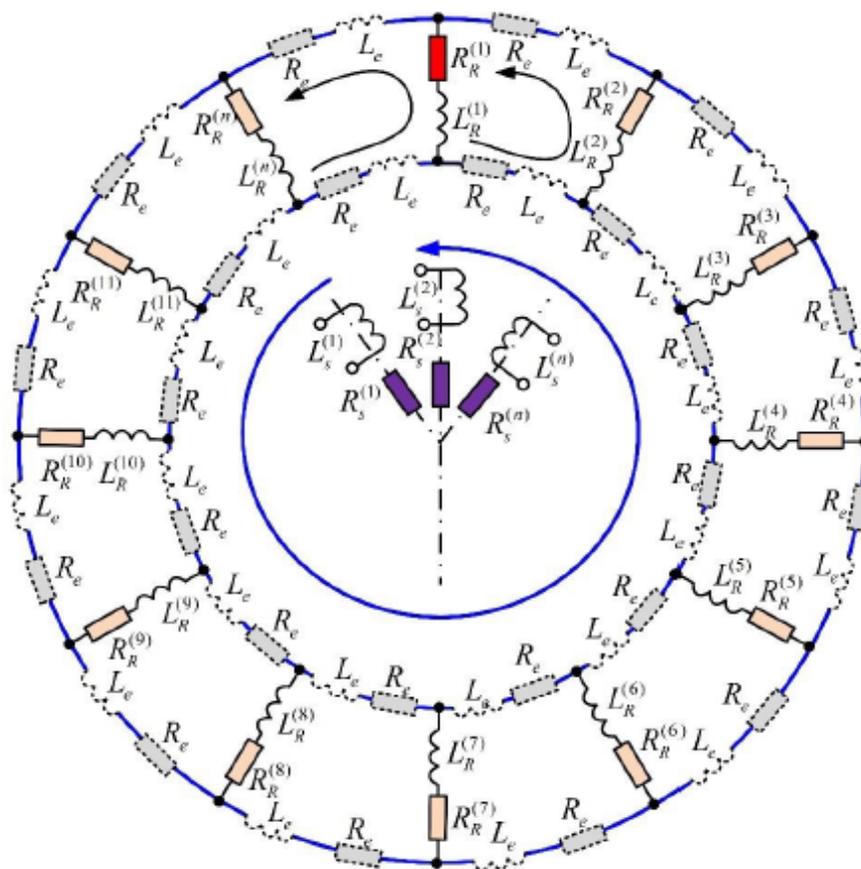


Рисунок 8 – Эквивалентная схема ротора и статора

Для построения  $n$ -фазной математической модели будем использовать общеизвестные принципы и выражения, которые применяются при моделировании асинхронных машин [61].

Система дифференциальных уравнений для  $n$ -фазной машины будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_s^{(1)}}{dt} = U^{(1)} - R_s \cdot i_s^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\Psi_s^{(n)}}{dt} = U^{(n)} - R_s \cdot i_s^{(n)} \\ \frac{d\Psi_R^{(1)}}{dt} = 0 - R_R \cdot i_R^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\Psi_R^{(n)}}{dt} = 0 - R_R \cdot i_R^{(n)} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

где  $R_S$  – активное сопротивление статора;  $R_R$  – активное сопротивление ротора;  $i_S$  – ток статора;  $i_R$  – ток ротора;  $\Psi_S$  – потокосцепление статора;  $\Psi_R$  – потокосцепление ротора;  $U$  – входное напряжение для статорной обмотки.

Из представленной системы дифференциальных (2.9) уравнений видно, что  $n$  – определяет количество стержней. С увеличением стержней в роторе порядок системы повышается, что усложняет расчеты.

Разрабатываемая математическая модель предназначена для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой при обрыве стержней. Вектор входных напряжений формируется из составляющих статора и ротора, но так как двигатель имеет короткозамкнутую обмотку, то входные воздействия для роторной цепи будут всегда равны нулю.

Вектор входных напряжений будет формироваться следующим образом:

$$U_{BX} = [U^{(1)} U^{(2)} \dots U^{(n)} 0 \dots 0^{(n)}]^T \quad (2.10)$$

Напряжения в многомерной системе координат описываются по следующему выражению:

$$U^{(n)}(t) = U_m \cdot \cos(\theta + \varphi_{сд}) \quad (2.11)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение,  $\theta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t = \omega \cdot t$ ,  $\varphi_{сд}$  – угол сдвига.

Зададимся напряжениями в трехфазной системе:

$$U_A(t) = \sqrt{2} U_A \sin(\omega \cdot t), \quad (2.12)$$

$$U_B(t) = \sqrt{2} U_B \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), \quad (2.13)$$

$$U_C(t) = \sqrt{2} U_C \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}), \quad (2.14)$$

$U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения двигателя.

Амплитудное значение напряжения для каждой фазы статора не зависит от системы координат:

$$U_m = \sqrt{U^2 + \frac{(U_B - U_C)^2}{3}} = \sqrt{2} \cdot U.$$

Угол  $\theta$  определим из уравнений напряжений в трехфазной системе координат:

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_A \sqrt{3}}{U_B - U_C}\right).$$

Угол сдвига между составляющими напряжений в многомерной системе будет зависеть от числа стержней  $n$ , как показано на рисунке 9:

$$\varphi_{сд} = \frac{2\pi}{n}.$$

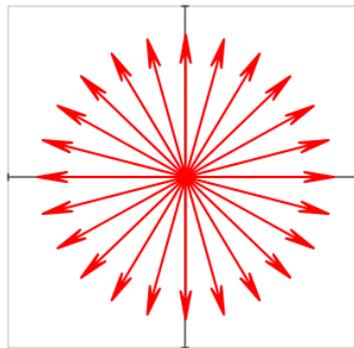


Рисунок 9 – Векторная диаграмма

Далее, согласно закону Ампера, находим токи в статоре и роторе:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_S \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} = L_0 \begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} = L_0^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_S \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix},$$

где  $L_0 = \begin{bmatrix} L_{S0} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{R0} \end{bmatrix}$  – матрица индуктивностей;  $L_{S0}$  – собственная матрица индуктивностей для статора;

$L_{R0}$  – собственная матрица индуктивностей для ротора;

$L_{SR} \ L_{RS}$  – матрицы взаимных индуктивностей;  $\bar{\Psi}_S = \begin{bmatrix} \Psi_S^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_S^{(n)} \end{bmatrix}$  – вектор

потокосцепления статора;  $\bar{\Psi}_R = \begin{bmatrix} \Psi_R^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_R^{(n)} \end{bmatrix}$  - вектор потокосцепления ротора;

$\bar{I}_S = \begin{bmatrix} I_S^{(1)} \\ \vdots \\ I_S^{(n)} \end{bmatrix}$  - вектор тока статора;  $\bar{I}_R = \begin{bmatrix} I_R^{(1)} \\ \vdots \\ I_R^{(n)} \end{bmatrix}$  - вектор тока ротора.

Для определения собственных матриц индуктивностей статора и ротора используется вспомогательная матрица коэффициентов  $Corr(\varphi)$ , которая имеет зависимость от  $\varphi$ :

$$Corr(\varphi) = \begin{bmatrix} 0 & \cos(\varphi) & \cos(2\varphi) & \dots & \cos(-(n-1)\varphi) \\ \cos(-\varphi) & 0 & \cos(\varphi) & \dots & \cos(-(n-2)\varphi) \\ \cos(-2\varphi) & \cos(-\varphi) & 0 & \dots & \cos(-(n-3)\varphi) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(-(n-1)\varphi) & \cos(-(n-2)\varphi) & \cos(-(n-3)\varphi) & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица собственных индуктивностей статора:

$$L_{S0} = L_m \cdot Corr(\varphi) + diag[L_S^{(1)}, L_S^{(2)} \dots L_S^{(n)}],$$

где  $L_m$  – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора

Матрица собственных индуктивностей ротора:

$$L_{R0} = L_m \cdot Corr(\varphi) + diag[L_R^{(1)}, L_R^{(2)} \dots L_R^{(n)}],$$

Вычисление матриц  $L_{S0}$  и  $L_{R0}$  не затрачивает значительных вычислительных мощностей, так как нет зависимости от угла положения ротора.

Элементы  $L_{SR}$  и  $L_{RS}$  задаются также с помощью вспомогательной матрицы, которая имеет зависимость от  $\varphi$  и  $\gamma$ :

$$Cosr(\gamma, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_e) & \cos(\gamma_e - \varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi) \\ \cos(\gamma_e - \varphi) & \cos(\gamma_e - \varphi - \varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi - \varphi) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi) & \cos(\gamma_e - \varphi - (n-1)\varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi - (n-1)\varphi) \end{bmatrix},$$

где  $\frac{d\gamma_e}{dt} = z_p \int \omega_r dt$  - угол поворота ротора.

Окончательные выражения для определения  $L_{SR}$  и  $L_{RS}$  имеют вид:

$$L_{RS} = L_m \cdot \cos r(\gamma, \varphi),$$

$$L_{SR} = L_m \cdot \cos r(\gamma, \varphi)^T.$$

После преобразований получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_s^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_s^{(n)}}{dt} \\ \frac{d\Psi_R^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_R^{(n)}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ \vdots \\ U^{(n)} \\ 0 \\ \vdots \\ 0^{(n)} \end{bmatrix} - R \cdot L_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_s^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_s^{(n)} \\ \Psi_R^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_R^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

где  $R = \begin{bmatrix} R_{S0} & 0 \\ 0 & R_{R0} \end{bmatrix}$  - главная матрица сопротивлений;  $R_{S0} = \text{diag}[R_S^{(1)}, R_S^{(2)} \dots R_S^{(n)}]$  - матрица сопротивлений статора;  $R_{R0} = \text{diag}[R_R^{(1)}, R_R^{(2)} \dots R_R^{(n)}]$  - матрица сопротивлений ротора.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется из токов статора и ротора:

$$M_{\text{об}} = -z_p \cdot \bar{I}_S^T \cdot L_n \cdot \bar{I}_R \cdot \frac{3}{n}, \quad (2.16)$$

где,  $z_p$  - число пар полюсов;

$$s(\varphi, \gamma) = \begin{bmatrix} \sin(\gamma_e) & \sin(\gamma_e - \varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi) \\ \sin(\gamma_e - \varphi) & \sin(\gamma_e - \varphi - \varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi - \varphi) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi) & \sin(\gamma_e - \varphi - (n-1)\varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi - (n-1)\varphi) \end{bmatrix},$$

- вспомогательная матрица;  $L_n = \frac{d[L_{RS}]}{d\gamma_e} = -s(\varphi, \gamma_e) \cdot L_m$ .

Для обеспечения необходимой мощности на валу двигателя в n-фазной системе координат вводится коэффициент  $3/n$ , который позволяет независимо от размерности системы дифференциальных уравнений обеспечивать паспортный момент двигателя.

Математическое описание механики асинхронной машины строится на базе одномассовой системы:

$$M_{\text{об}} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.17)$$

где  $J$  - момент инерции двигателя;  $M_C$  – момент нагрузки.

Имитация обрыва стержней в данном математическом описании реализуется с помощью введения добавочного сопротивления в матрицу  $R_{OR}$  для соответствующего стержня.

Для диагностики обрыва стержней в роторе используется огибающая вектора тока:

$$I_{m1} = \sqrt{I_S^{(1)} + I_S^{(2)} + I_S^{(3)} \dots I_S^{(n)}},$$

где  $I_S^{(l)}$  – фазный ток статора.

Согласование огибающей вектора в  $n$ -фазной системе координат с трехфазной реализуется с помощью масштабирующего коэффициента  $k$ , который зависит от размерности системы:

$$k = \sqrt{\frac{3}{n}}. \quad (2.18)$$

Значение огибающей тока в трехфазной системе можно найти по выражению:

$$I_m = I_{m1} \cdot k,$$

где  $I_{m1}$  – вектор огибающей тока в многофазной системе.

## **2.4 Математическое описание трехфазной машины при неподвижном роторе в аналитическом виде**

Исследование режимов работы асинхронной машины можно производить и при неподвижном роторе. При нулевой угловой скорости ротора математическое описание значительно упрощается и есть возможность получить аналитические выражения. Так как режим покоя для  $n$ -фазной модели является частным случаем, то полученные результаты можно использовать для подтверждения ее работоспособности.

Рассмотрим синтез системы уравнений, позволяющий получить в аналитическом виде описание токов для трехфазной машины при неподвижном роторе при угле между обмотками статора и ротора (рисунок 10):

$$\alpha = 0, \cos(\alpha), \cos(\alpha + 2\pi/3) = -1/2, \cos(\alpha - 2\pi/3) = -1/2$$

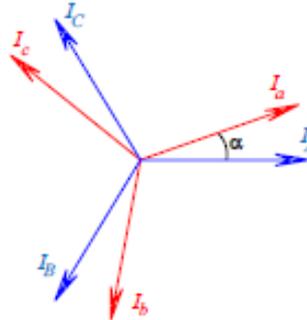


Рисунок 10 – Векторная диаграмма токов статора и ротора

Взаимные индуктивности при этом составляют:

$$\begin{aligned} M_{Aa} &= M_{aA} = L_m \cos(\alpha) = L_m, \\ M_{Ab} &= M_{bA} = L_m \cos(\alpha + 2\pi/3) = -1/2 L_m, \\ M_{Ac} &= M_{cA} = L_m \cos(\alpha - 2\pi/3) = -1/2 L_m. \end{aligned}$$

Учитываем влияние взаимной индуктивности обмоток статора и обмоток ротора, получаем систему дифференциальных уравнений для обмоток ротора:

$$\begin{cases} L_R \frac{di_a}{dt} + i_a R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_C}{dt} \right) = 0 \\ L_R \frac{di_b}{dt} + i_b R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_C}{dt} \right) = 0 \\ L_R \frac{di_c}{dt} + i_c R_R - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_A}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_C}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_A}{dt} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

и уравнения для обмоток статора:

$$\begin{cases} L_S \frac{di_A}{dt} + i_A R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_c}{dt} \right) = 0 \\ L_S \frac{di_B}{dt} + i_B R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_a}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_c}{dt} \right) = 0 \\ L_S \frac{di_C}{dt} + i_C R_S - \frac{1}{2} L_m \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_A}{dt} \right) + L_m \left( \frac{di_c}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{2} \frac{di_a}{dt} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Здесь, индексы R и S означают принадлежность сопротивлений и индуктивностей к ротору и статору соответственно.

Разрешим эти системы уравнений (2.19) и (2.20) относительно производных и запишем систему в форме Коши:

$$\begin{pmatrix} di_a / dt \\ di_b / dt \\ di_c / dt \\ di_A / dt \\ di_B / dt \\ di_C / dt \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + B$$

или в развернутом виде:

$$\begin{pmatrix} di_a / dt \\ di_b / dt \\ di_c / dt \\ di_A / dt \\ di_B / dt \\ di_C / dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + B,$$

где:

$$B = \frac{1}{2L_S L_R + L_m(L_R + L_S - 4L_m)} \times \begin{cases} L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_A \\ L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_B \\ L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_C \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_A - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_B - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_C - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \end{cases} \quad (2.21)$$

Такая запись (2.21) удобна тем, что если система векторов напряжений статора симметрична, то комбинации вида  $(U_A + U_B + U_C)$  будут равняться нулю.

Здесь матрицы  $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$  симметричные и имеют следующий вид:

$$A_{11} = \frac{L_m R_R (L_S - L_m)}{(L_R - L_m)[2L_R L_S + (L_S + L_R - 4L_m)L_m]} \times \begin{pmatrix} c & -1 & -1 \\ -1 & c & -1 \\ -1 & -1 & c \end{pmatrix},$$

$$A_{22} = \frac{L_m R_S (L_R - L_m)}{(L_S - L_m)[2L_R L_S + (L_S + L_R - 4L_m)L_m]} \times \begin{pmatrix} d & -1 & -1 \\ -1 & d & -1 \\ -1 & -1 & d \end{pmatrix},$$

где  $c = \frac{(2L_m R_R - L_R R_R + L_S R_R)L_m - 2L_R L_S R_R}{L_m R_R (L_S - L_m)}$ ,  $d = \frac{[(2L_m + L_R - L_S)L_m - 2L_R L_S]R_S}{L_m R_S (L_R - L_m)}$ ,

$$A_{12} = \frac{L_m R_S}{2L_R L_S + (L_S + L_R - 4L_m)L_m} \times \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix},$$

$$A_{21} = \frac{L_m R_R}{2L_R L_S + (L_R + L_S - 4L_m)L_m} \times \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix},$$

Для вычисления корней решаем характеристическое уравнение:

$$|A - Ip| = 0, \quad A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix},$$

Здесь  $I$  – единичная матрица шестого порядка,  $p$  – корень характеристического уравнения.

Получаем аналитическое решение для корней характеристического уравнения:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_R}{L_R - L_m} \\ \frac{-R_S}{L_S - L_m} \\ -\frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_4} \end{pmatrix},$$

$$S_1 = 2(L_R R_S - L_S R_R); \quad S_2 = L_m (R_S + R_R);$$

где:  $S_3 = \sqrt{(L_R R_S - L_S R_R)^2 4 + 4L_m (L_S R_R^2 + L_R R_R^2 - R_S R_R (L_R + L_S)) + L_m^2 (R_R^2 + R_S^2 + 34R_R R_S)}$ ;

$$S_4 = 2(2L_R L_S - L_m (L_R + L_S - 4L_m)).$$

Приведем обратную матрицу системы, построенной на основе (2.17) и (2.18):

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} \\ \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} \\ \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} \\ \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} \end{pmatrix}.$$

Правильность вычисления матриц А и В, можно проверить, умножив обратную матрицу  $A^{-1}$  на вектор внешнего воздействия В, предполагая, что внешние напряжения постоянные, например равны единице. Легко увидеть, что при этом получается установившиеся значения токов статора в каждой фазе как напряжения фаз деленное на активные сопротивления статорной цепи, а токи в короткозамкнутом роторе равны нулю:

$$-A^{-1}B = \begin{pmatrix} \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} \\ \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_R}{R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{L_m}{2R_R} & \frac{-L_m}{R_R} \\ \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} \\ \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} \\ \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_m}{R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{L_m}{2R_S} & \frac{-L_S}{R_S} \end{pmatrix} \frac{1}{2L_S L_R + L_m(L_R + L_S - 4L_m)} \times$$

$$\times \begin{cases} L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_A \\ L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_B \\ L_m(U_A + U_B + U_C) - 3L_m U_C \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_A - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_B - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \\ \frac{(L_m(2L_R + L_m - L_S) - 2L_R L_S)U_C - (L_m^2 - L_m L_R)(U_A + U_B + U_C)}{L_S - L_m} \end{cases}$$

Аналитическое выражение для переменного синусоидального тока получается громоздким, поэтому приведем его в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} i_{a_{ycm}} \\ i_{b_{ycm}} \\ i_{c_{ycm}} \\ i_{A_{ycm}} \\ i_{B_{ycm}} \\ i_{C_{ycm}} \end{pmatrix} = \text{Im}((Ij\omega - A)^{-1} B e^{j\omega t}) = \begin{pmatrix} I_a \sin(\omega t + \varphi_a) \\ I_b \sin(\omega t + \varphi_b) \\ I_c \sin(\omega t + \varphi_c) \\ I_A \sin(\omega t + \varphi_A) \\ I_B \sin(\omega t + \varphi_B) \\ I_C \sin(\omega t + \varphi_C) \end{pmatrix},$$

Амплитуда и фаза, которых, определяются решением системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} I_a e^{j\varphi_a} \\ I_b e^{j\varphi_b} \\ I_c e^{j\varphi_c} \\ I_A e^{j\varphi_A} \\ I_B e^{j\varphi_B} \\ I_C e^{j\varphi_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_R + j\omega L_R & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & j\omega L_m & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} \\ -j\omega \frac{L_m}{2} & R_R + j\omega L_R & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & j\omega L_m & -j\omega \frac{L_m}{2} \\ -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & R_R + j\omega L_R & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & j\omega L_m \\ j\omega L_m & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & R_S + j\omega L_S & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} \\ -j\omega \frac{L_m}{2} & j\omega L_m & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & R_S + j\omega L_S & -j\omega \frac{L_m}{2} \\ -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & j\omega L_m & -j\omega \frac{L_m}{2} & -j\omega \frac{L_m}{2} & R_S + j\omega L_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_A \\ U_A a^2 \\ U_A a \end{pmatrix},$$

Здесь,  $a$  – оператор поворота,  $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}$

Наличие матрицы состояния  $A$  и корней характеристического уравнения  $p$ , можно записать решение в аналитическом виде:

$$\begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a(0) \\ i_b(0) \\ i_c(0) \\ i_A(0) \\ i_B(0) \\ i_C(0) \end{pmatrix} e^{At} + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B(\tau) d\tau, \quad (2.22)$$

Здесь  $e^{At}$ - экспоненциальная матрица, которая представляется в виде:

$$e^{At} = I\alpha_0(t) + A\alpha_1(t) + A^2\alpha_2(t) + A^3\alpha_3(t) + A^4\alpha_4(t) + A^5\alpha_5(t).$$

Коэффициенты разложения  $\alpha_0(t), \alpha_1(t), \dots, \alpha_6(t)$ , определяются корнями характеристического уравнения:

$$\alpha(t) = P^{-1} \cdot \exp(pt) \Rightarrow \beta = \begin{pmatrix} \alpha_0(t) \\ \alpha_1(t) \\ \alpha_2(t) \\ \alpha_3(t) \\ \alpha_4(t) \\ \alpha_5(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & p_1 & p_1^2 & p_1^3 & p_1^4 & p_1^5 \\ 1 & p_2 & p_2^2 & p_2^3 & p_2^4 & p_2^5 \\ 1 & p_3 & p_3^2 & p_3^3 & p_3^4 & p_3^5 \\ 1 & p_4 & p_4^2 & p_4^3 & p_4^4 & p_4^5 \\ 1 & p_5 & p_5^2 & p_5^3 & p_5^4 & p_5^5 \\ 1 & p_6 & p_6^2 & p_6^3 & p_6^4 & p_6^5 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e^{jp_1 t} \\ e^{jp_2 t} \\ e^{jp_3 t} \\ e^{jp_4 t} \\ e^{jp_5 t} \\ e^{jp_6 t} \end{pmatrix}.$$

Следует учесть, что, если ее размерность обратной матрицы выше трех, при наличии кратных корней она может быть сингулярной. В этом случае следует сдвинуть ее спектр на малую величину  $\lambda^{-10}$ .

$$\alpha(t) = (P - I\lambda)^{-1} \cdot \exp(pt).$$

## 2.5 Сравнительный анализ математических моделей

Математическая модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат устанавливает основные взаимосвязи между подсистемами электродвигателя (механической, электромагнитной), которые являются основой для других моделей.

Одним из недостатков модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат является то, что она не позволяет учесть электрическую несимметрию роторных цепей. Поэтому данная модель не может использоваться для моделирования двигателя с повреждениями стержней ротора.

Часто процесс преобразования энергии в АД с короткозамкнутой обмоткой ротора в переходных и стационарных режимах описывается математической моделью в фазных координатах, однако для исследований, связанных с электрической несимметрией роторных цепей, наиболее подходящей является модель в  $m$  фазной системе координат.

Представление математической модели АД в  $m$  – фазной системе координат позволяет максимально достоверно описать физические процессы в статорных обмотках при повреждении «беличьей клетки» ротора.

Преимуществом данной модели является возможность введения в модель повреждений стержней беличьей клетки ротора асинхронного двигателя. Главным недостатком модели является ее сложность [2].

### 3 СИНТЕЗ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБРЫВА СТЕРЖНЕЙ В РОТОРЕ

#### 3.1 Разработка и тестирование имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в $m$ – фазной системе координат в программной среде Matlab Simulink

Математическая модель разработана в программной среде MATLAB и ее расширении Simulink, которое позволяет производить блочное визуально-ориентированное имитационное моделирование различных систем и устройств.

Для исследования был выбран асинхронный электродвигатель типа АДМ100S4У3 с параметрами, показанными в таблице 6.

Таблица 6 – параметры двигателя АДМ100S4У3

$P_n$ , кВт	$I_n$ , А	$n_n$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$U_\phi$ , В	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
3	7,17	1410	82	0,82	220	0,01

В таблице 7 представлены параметры схемы замещения АДМ100S4У3, рассчитанные согласно [62].

Таблица 7 – параметры схемы замещения двигателя АДМ100S4У3

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$L_1$ , Гн	$L_2$ , Гн	$L_m$ , Гн
1,851	1,118	0,011	0,014	0,2138

При изменении числа фаз необходимо учитывать, что меняется максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора:

$$L_{m1} = L_m \cdot \frac{2}{n_1},$$

где  $n_1$  – число фаз статора и ротора.

Число стержней для исследуемого двигателя было принято  $n = 28$ .

Имитационная модель АД с короткозамкнутым ротором представлена на рисунке 11. Для обеспечения оптимальных расчетных показателей был выбран метод Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированными шагом расчета 0.00002 с.

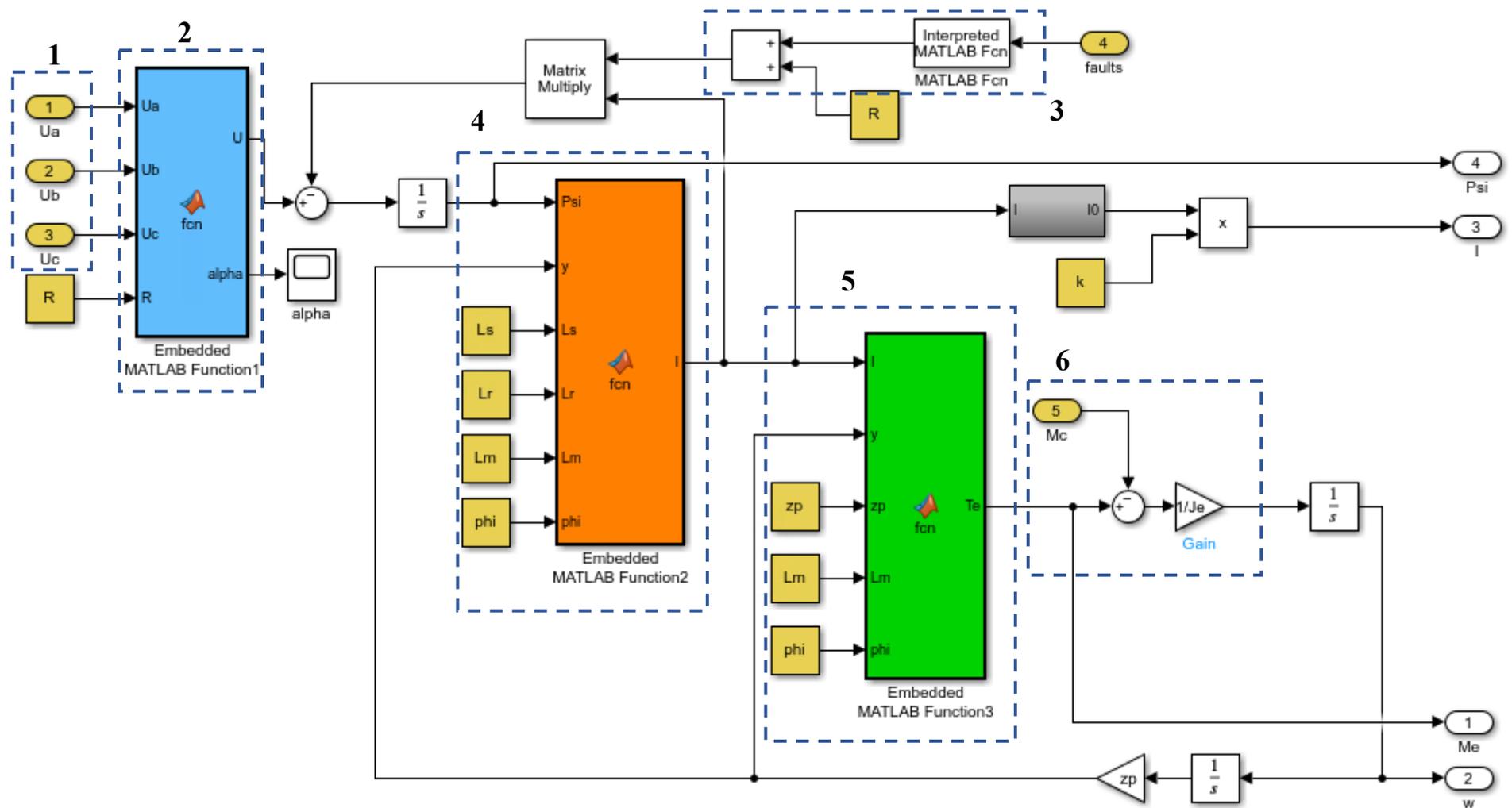


Рисунок 11 – Схема имитационной модели асинхронного двигателя с повреждениями стержней ротора

В блок 1 подаются трехфазные синусоидальные напряжения (2.12), (2.13), (2.14), которые сдвинуты на 120 градусов. Затем с помощью блока 2 преобразуются мгновенные напряжения из трехфазной системы координат в многофазную по выражению (2.11). Размерность системы координат определяется количеством фаз статора и ротора.

Задание повреждений в стержнях ротора реализуется путем увеличения сопротивления в блоке 3, который позволяет сформировать место и количество повреждённых стержней.

В блоке 4 осуществляется расчет токов статора и ротора на основе системы дифференциальных уравнений (2.15), а в блоке 5 момента двигателя с помощью соотношения (2.16).

Далее на основе полученного момента двигателя определяется угловая скорость вала ротора (блок 6) по дифференциальному уравнению (2.17), где входным воздействием является момент двигателя, полученный с помощью блока 5. Данные о скорости используются для определения угла, который необходим для вычисления взаимных индуктивностей в блоке 4.

Блоки 2, 4 и 5, реализованы программным способом, алгоритмы которых показаны в таблицах 8 и 9. Инициализация параметров для расчета модели происходит с помощью Script (таблица 9).

Таблица 8 – Программный код блоков 2 и 4

Embedded MATLAB Function1 (блок 2)	Embedded MATLAB Function2 (блок 4)
<pre>function [U , alpha]=fcn(Ua,Ub,Uc,R) n=round(length(R)/2); U=zeros(2*n,1); phi=2*pi/n; Uabs=sqrt(Ua^2+(Ub-Uc)^2/3); alpha=atan2(Ua,(Ub-Uc)/sqrt(3)); for i=1:n     U(i,1)=Uabs*cos(alpha+(i-1)*phi); end</pre>	<pre>function I=fcn(Psi,y,Ls,Lr,Lm,phi) n=round(length(Psi)/2); Cosr=zeros(n,n); for i=1:n     for j=1:n         Cosr(i,j)=cos(y-(j-1)*phi-(i-1)*phi);     end end Lrs=Lm*Cosr; Lsr=Lm*Cosr'; L=[Ls Lsr; Lrs Lr]; I=L\Psi;</pre>

Таблица 9 – Программный код блока 9 и Script для задания параметров модели

Embedded MATLAB Function3 (блок 5)	Script
<pre>function Te=fcn(I,y,zp,Lm,phi) nn=length(I); n=round(nn/2); Is=I(1:n,1)'; Ir=I((n+1):nn,1); m=zeros(n,n); for i=1:n     for j=1:n         m(i,j)=sin(y-(j-1)*phi-(i-1)*phi);     end end mm=Lm*m; Te=-zp*Is*mm*Ir*3/n;</pre>	<pre>zp=2; n=28; R1=1.851; R2=2.236; Lm=0.168/11; L1=0.011+Lm; L2=0.014+Lm; Je=0.01; Mn = 20.3;  R=diag([ones(1,n)*R1 ones(1,n)*R2]); phi=2*pi/n; Corr=zeros(n,n); for i=0:(n-1)     for j=0:(n-1)         Corr(i+1,j+1)=cos((j-i)*phi);     end     Corr(i+1,i+1)=0; end Ls=Lm*Corr+diag(ones(1,n)*L1); Lr=Lm*Corr+diag(ones(1,n)*L2);</pre>

Результаты моделирования пуска двухфазной и многофазной модели АДМ100S4У3 без повреждений на холостом ходу и с набросом нагрузки в момент времени  $t=2\text{с}$  показаны на рисунках 12, 13, 14.

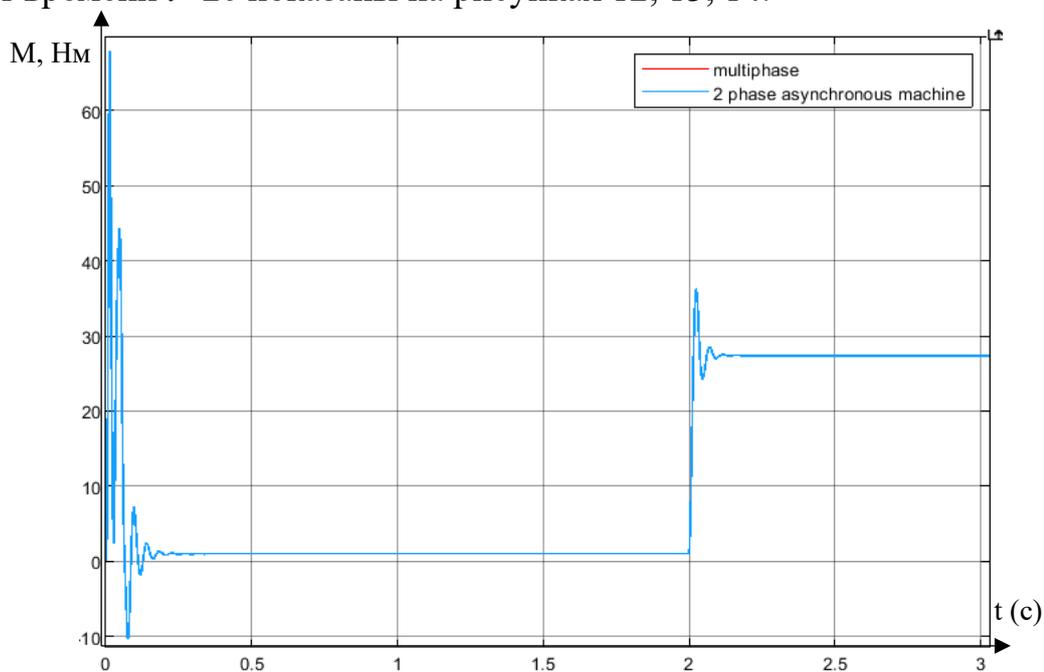


Рисунок 12 – Переходные процессы момента без обрыва с набросом нагрузки в момент  $t=2\text{с}$

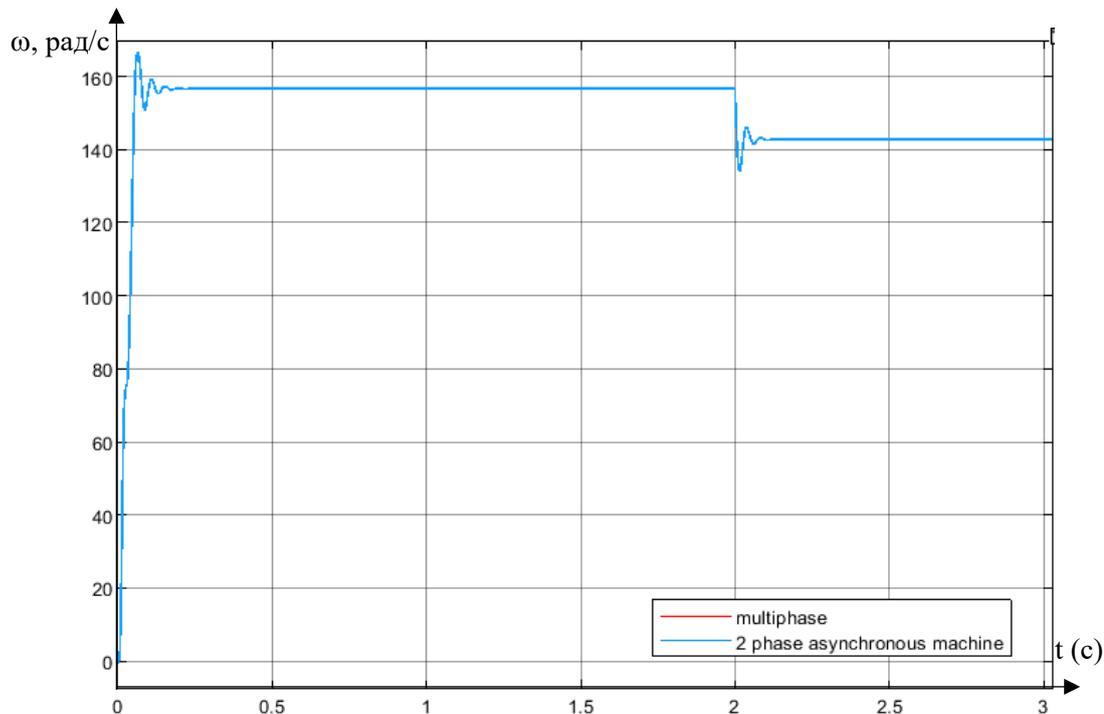


Рисунок 13 – Переходные процессы скорости с набросом нагрузки в момент

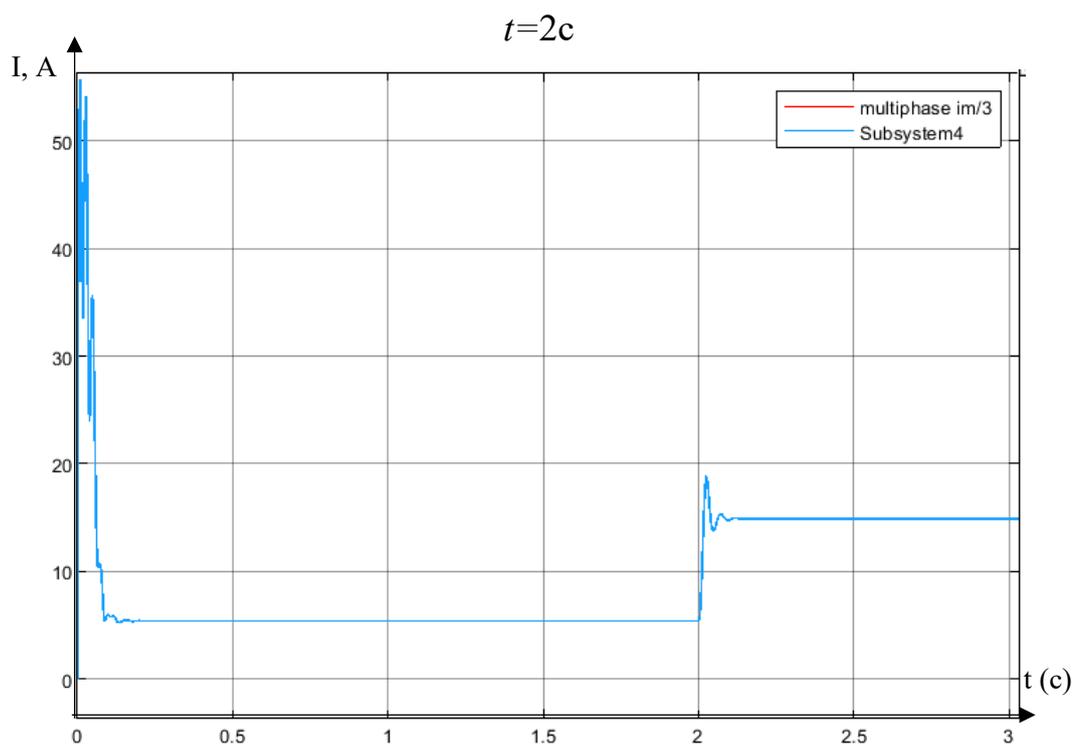


Рисунок 14 – Переходные процессы вектора огибающей тока статора с набросом нагрузки в момент  $t=2c$

Результаты мгновенных значений относительной погрешности в процентном соотношении для момента, скорости и огибающей тока статора приведены на рисунках 15, 16, 17.

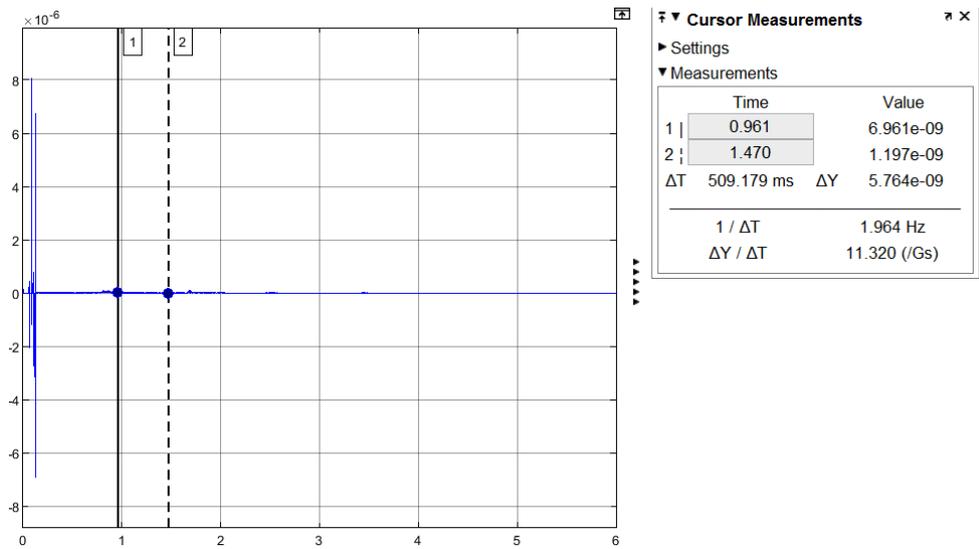


Рисунок 15 – Мгновенное значение относительной погрешности момента

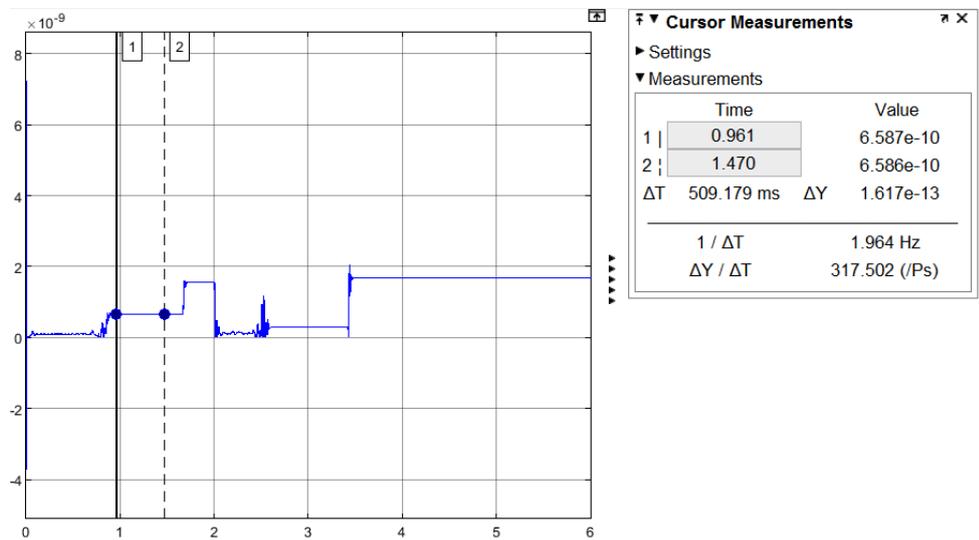


Рисунок 16 – Мгновенное значение относительной погрешности скорости

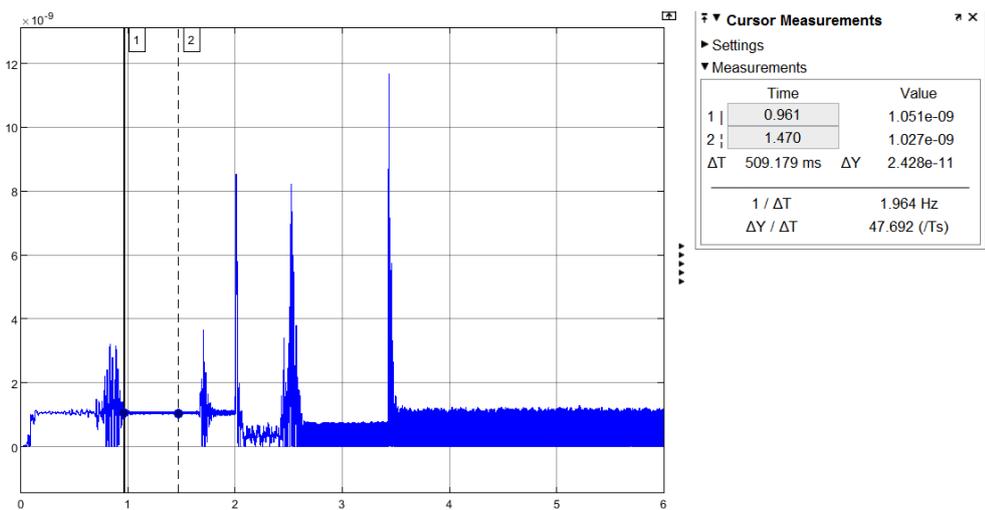


Рисунок 17 – Мгновенное значение относительной погрешности вектора  
огибающей тока статора

На основании переходных процессов в двухфазной и многофазной системе координат, а также мгновенных значениях относительной погрешности момента, скорости и огибающей тока статора, можно сделать вывод, что разработанная  $n$ -фазная математическая модель асинхронной машины, позволяет с приемлемой точностью исследовать работу двигателя.

Исследование обрыва стержней в роторе проводится с использованием  $n$ -фазной асинхронной машины, путем введения добавочного сопротивления в уравнения для соответствующей фазы. Так как модель в двухфазной системе координат не позволяет учесть электрическую несимметрию роторных цепей, она не может быть использована для моделирования двигателя с подобными повреждениями [63].

Графики переходных процессов момента и скорости в номинальном состоянии и при обрыве трех стержней при различных режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка) показаны на рисунке 18.

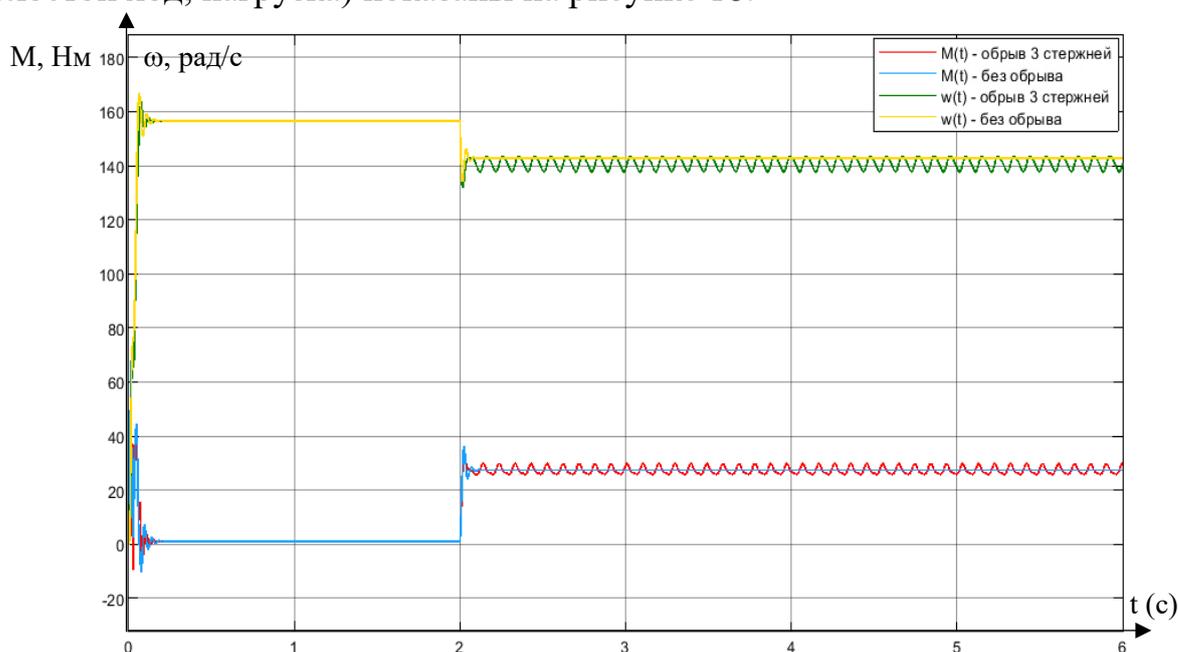


Рисунок 18 – Переходные процессы скорости и момента с обрывом и нормальным состоянием

При обрыве 3 стержней появляются низкочастотные колебания в переходных процессах, которые усиливаются под нагрузкой на валу двигателя

С появлением аварийных стержней, в огибающей тока наблюдаются гармонические колебания, которые зависят от текущей нагрузки и от

процентного соотношения дефектных стержней и нормальных. На рисунках 19-21 показаны кривые токов статора в различных режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка) при разных состояниях роторной цепи (1, 2, 3 оборванных стержня).

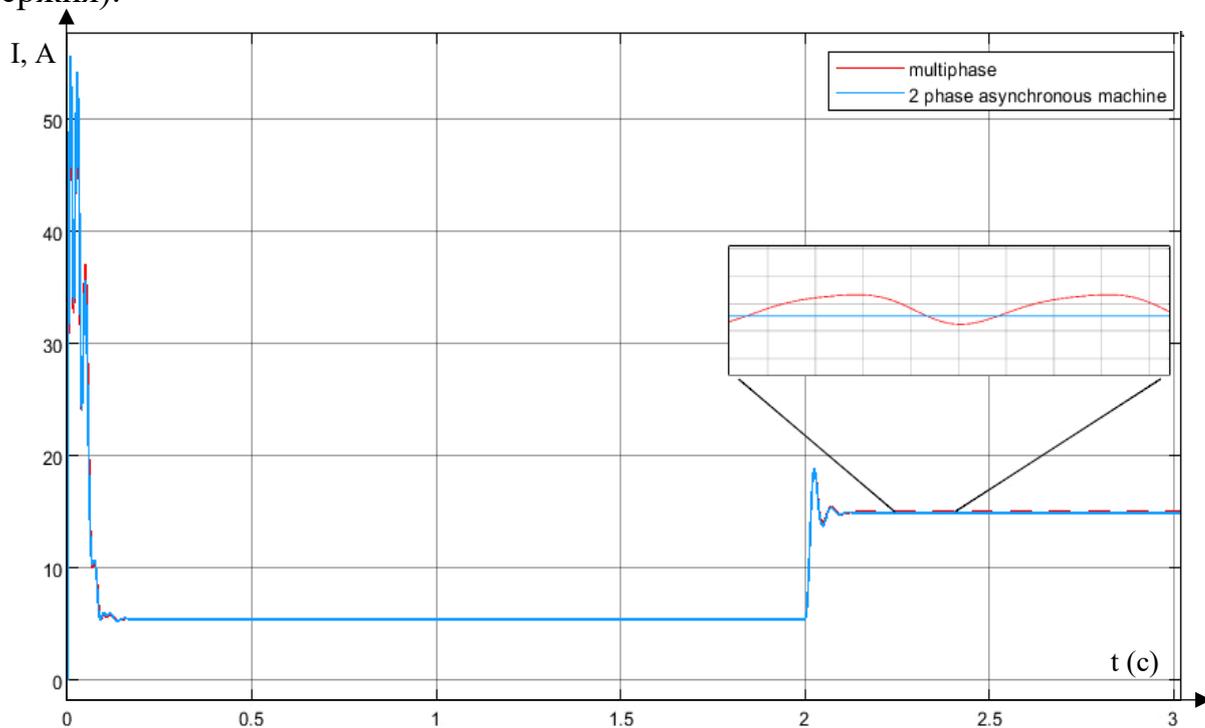


Рисунок 19 – Вектор огибающей тока статора в различных режимах работы АД при обрыве одного стержня

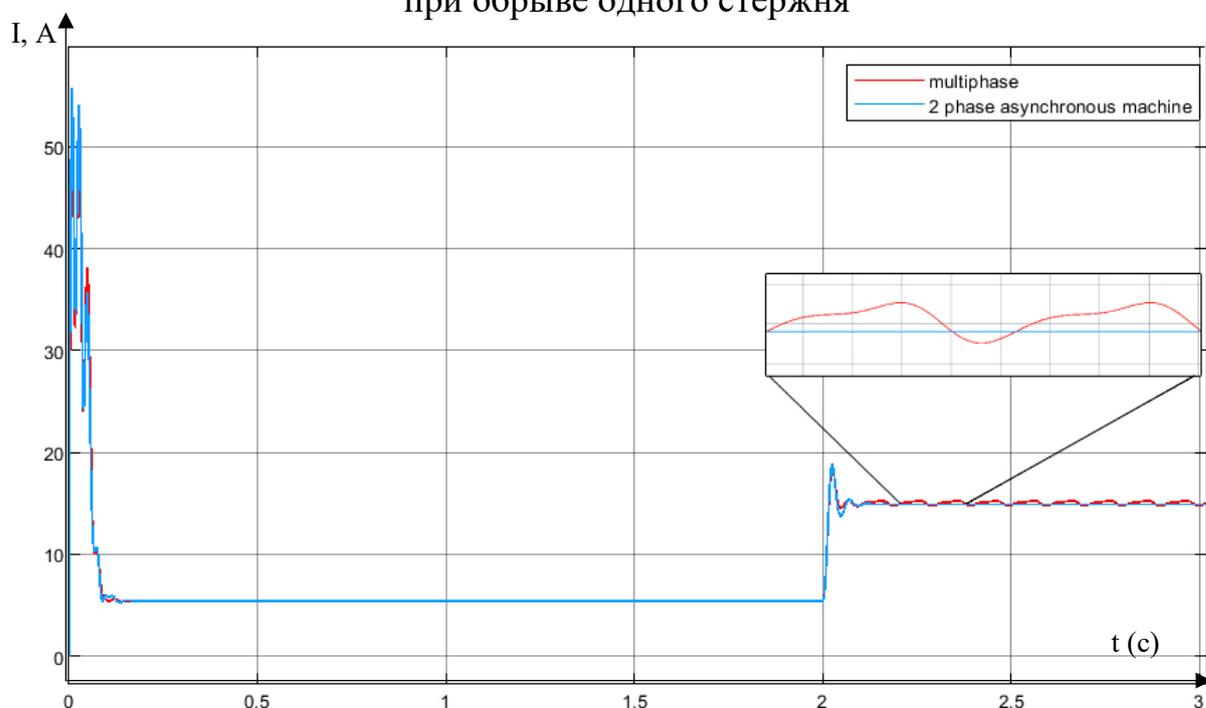


Рисунок 20 – Вектор огибающей тока статора в различных режимах работы АД при обрыве двух стержней

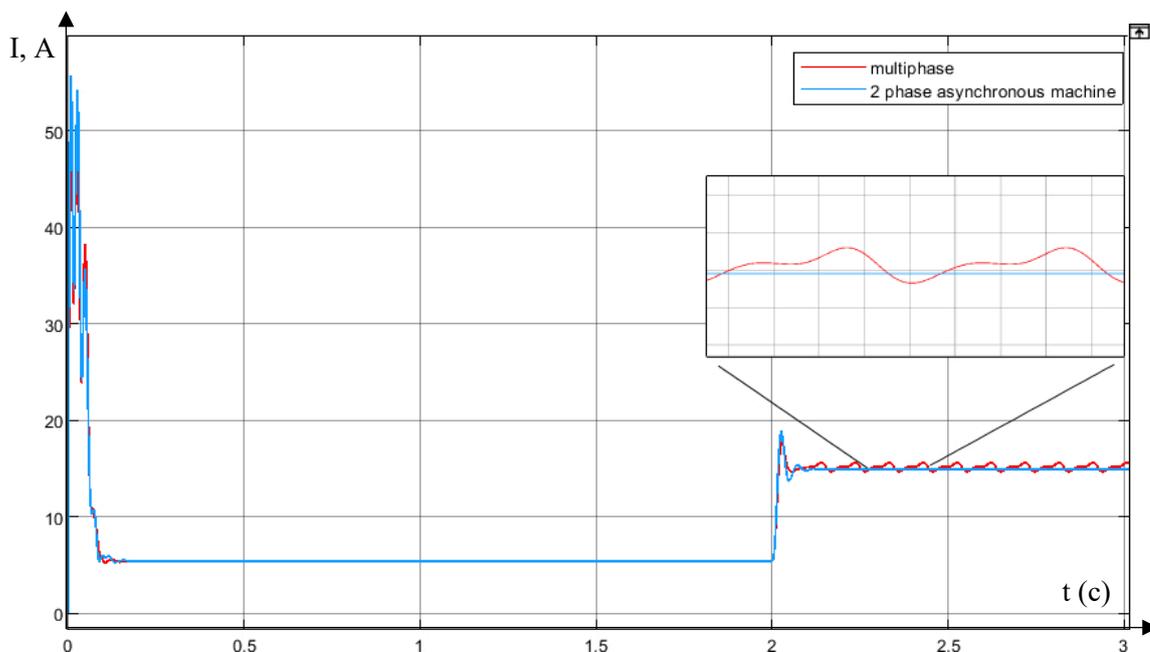


Рисунок 21 – Вектор огибающей тока статора в различных режимах работы АД при обрыве трех стержней

Из рисунков 19 – 21 видно, что гармонические колебания при обрыве стержней имеют определённую частоту и амплитуду. Анализируя эти составляющие, а также их форму, можно сделать выводы о текущем состоянии двигателя. Огибающая токов статора содержит диагностический признак, позволяющий с определённой точностью определить обрыв стержня в роторе.

### 3.2 Разработка диагностической системы для выявления повреждений в роторной цепи

Важной задачей является фильтрация высокочастотной составляющей вектора огибающей тока статора. При использовании большинства видов фильтров в диагностических системах существуют риски отфильтровки полезного сигнала, который необходим для диагностики состояния двигателя.

Для исследования был выбран КИХ фильтр, так как он имеет следующие достоинства:

1. Устойчив;
2. Имеет простой расчет и настройку;
3. Относительно простая конструкция.

На рисунке 22 приведена функциональная схема системы диагностики. На вход подаются фазные токи статора, которые имеют зашумленность, вызванную работой частотного преобразователя, далее происходит расчет огибающей вектора тока, в котором также присутствуют шумы. Для получения полезного сигнала применяется КИХ фильтр, который выделяет низкочастотную составляющую. По полученному сигналу определяется постоянная величина и выделяется переменная составляющая, которая преобразуется в однополярный сигнал, и в последствии рассчитывается средняя составляющая тока.

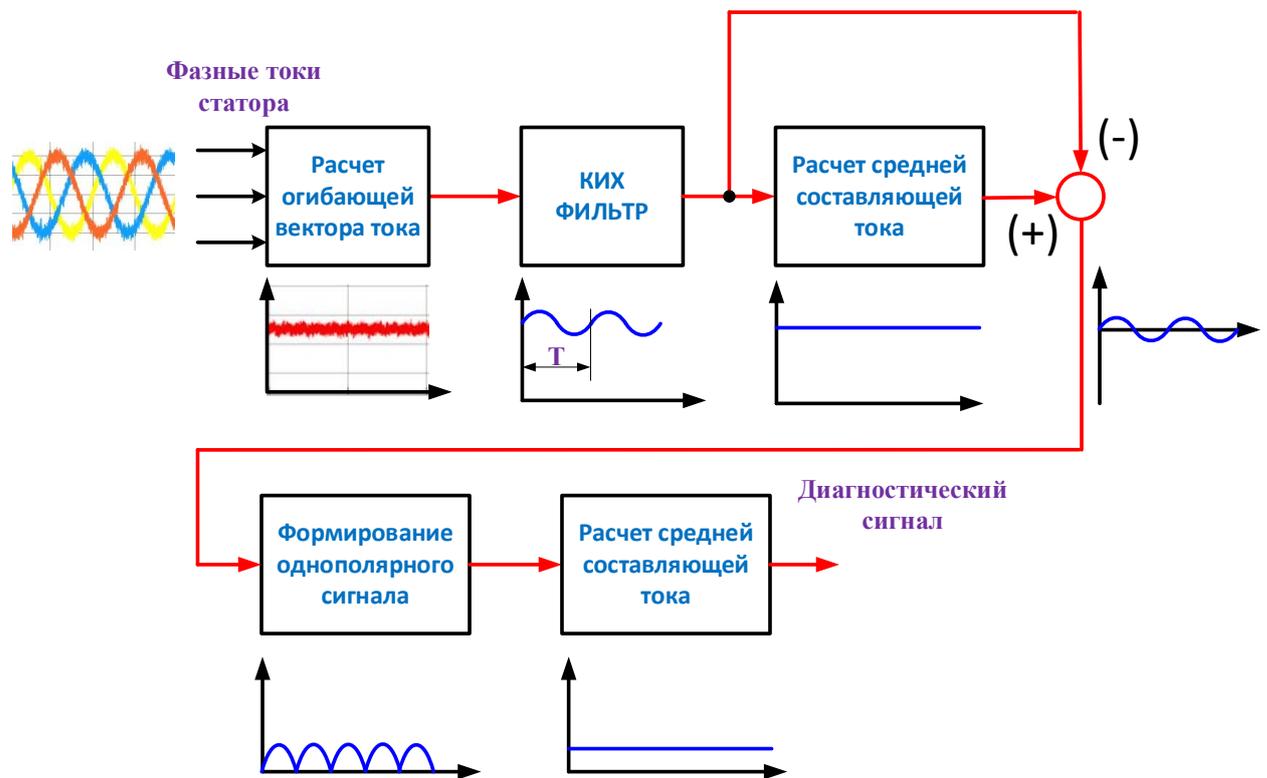


Рисунок 22 – Функциональная схема системы диагностики

Алгоритм работы диагностической системы:

1. Расчет вектор огибающей тока:

$$I_o(n) = \sqrt{I_a^2(n) + I_b^2(n) + I_c^2(n)},$$

где  $I_a, I_b, I_c$  - фазные токи статора

2. Снижение уровня шумов с помощью КИХ фильтра (рисунок 23):

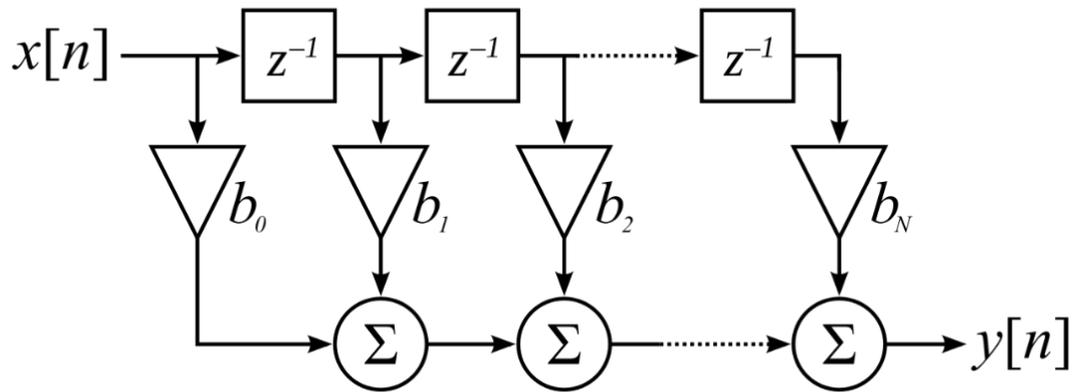


Рисунок 23 – Структурная схема КИХ фильтра

Выходной сигнал фильтра:

$$I_{0\phi}(n) = y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} b_l x(n-l)$$

Передаточная характеристика фильтра:

$$H(z) = \sum_{l=0}^{L-1} b_l z^{-l}$$

3. Расчет средней составляющей:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^k h \cdot I_{0\phi}(n)$$

4. Формирование однополярного сигнала:

$$I_{\text{од}}(n) = |I_{0\phi}(n) - I_{\text{ср}}|$$

5. Вычисление средней составляющей для однополярного сигнала:

$$I_{\text{ср\_вых}} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^k h \cdot I_{\text{од}}(n)$$

Имитационная модель диагностической системы в программной среде MATLAB-Simulink представлена на рисунке 24.

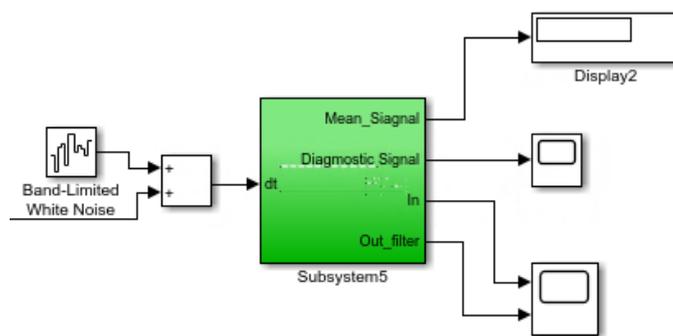


Рисунок 24 – Имитационная модель диагностической системы

Подсистема блока *Subsystem5* изображена на рисунке 25.

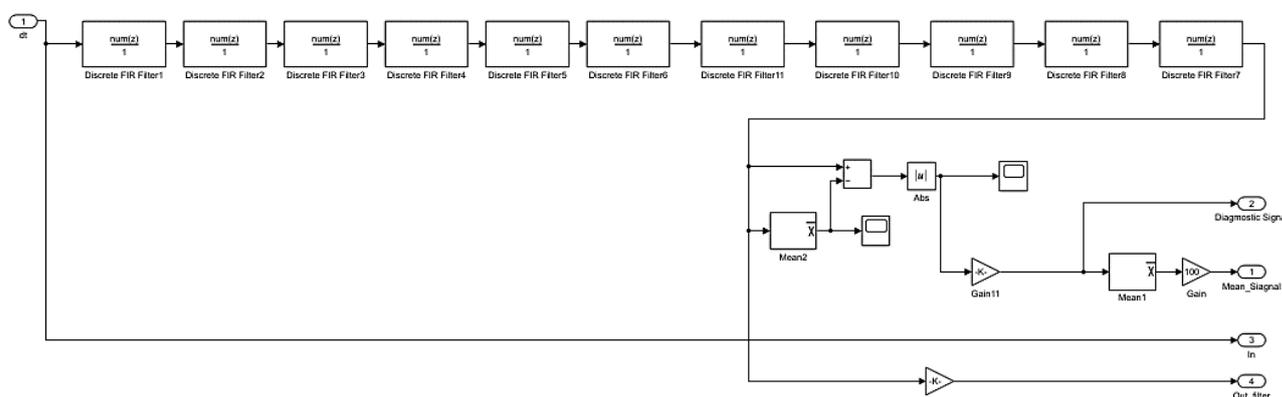


Рисунок 25 – Подсистема блока *Subsystem5*

### 3.3 Исследование работы диагностической системы

В данной работе шумы от работы переключения ключей частотного преобразователя моделируются искусственно, при помощи блока *Band-Limited White Noise* (рисунок 24) в целях экономии расчетных мощностей и разгрузки имитационной модели.

На рисунке 26 приведены осциллограммы вектора огибающей тока статора при обрыве трех стержней до фильтрации и после.

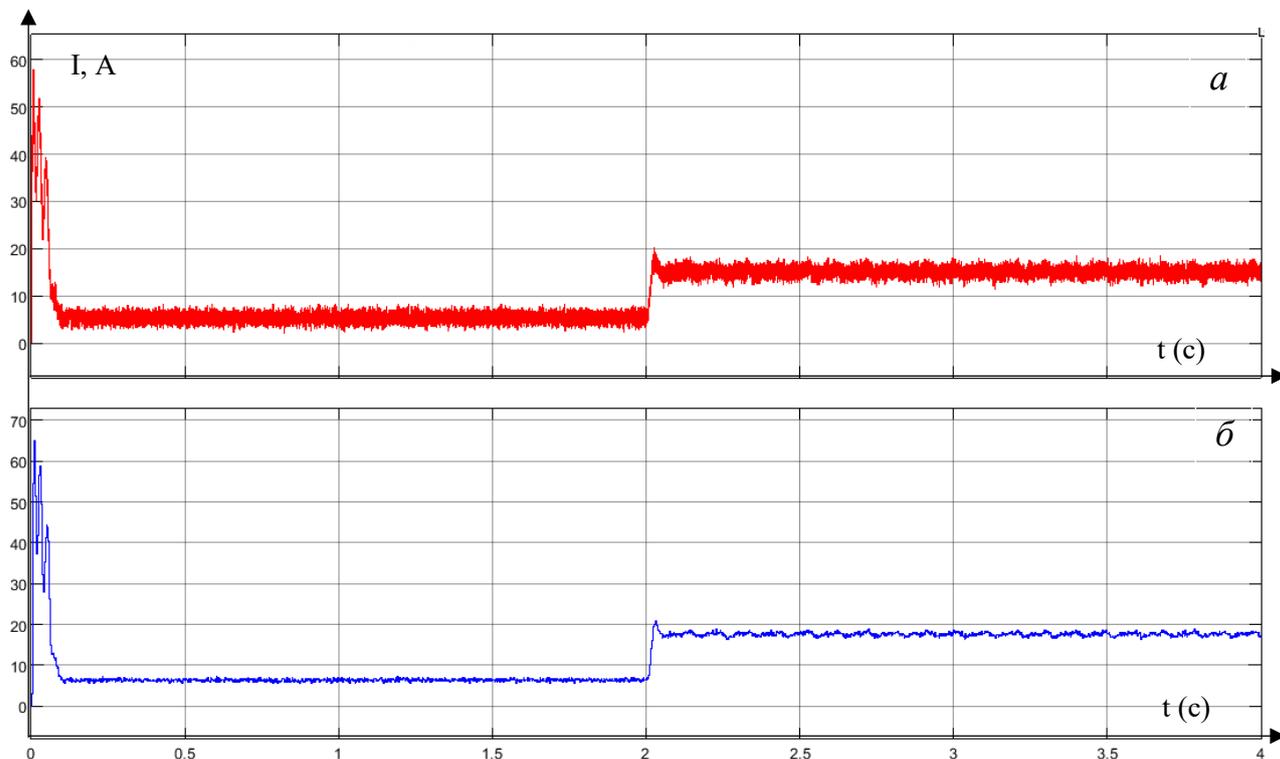


Рисунок 26 – Вектор огибающей тока статора в различных режимах работы АД при обрыве трех стержней (а – до фильтрации, б – после фильтрации)

После фильтрации наблюдаются низкочастотные колебания, а с увеличением нагрузки двигателя, полезный сигнал становится более информативным. Полученные параметры КИХ фильтра показали, что диагностический признак сохранился.

Для численного выражения величины колебаний (диагностического сигнала) при помощи блока *Mean2* в подсистеме *Subsystem5* (рисунок 25), исключается постоянная составляющая сигнала. Блок *Abs* преобразует переменную составляющую сигнала в однополярный, и при помощи блока *Mean1* выделяется средняя составляющая, которая будет показывать величину колебаний в относительных единицах и выводить эти показания на блоке *Display2*.

Полученные таким методом значения колебаний – будут являться диагностическим критерием перехода двигателя из рабочего состояния в неисправное. Для этого, необходимо задаться эталонным значением величины колебаний при работе двигателя на 70% нагрузке и без повреждения стержней. Эталонные значения задаются для конкретного электропривода с нормальным

состоянием обмоток, т.е. после монтажа и наладки фиксируются значения, которые принимаются за эталонные.

Значения блока *Display2* в нормальном состоянии и в аварийных состояниях приведены в таблице 10.

Таблица 10 – значения колебаний с блока *Display2*

Эталонное значение колебаний (без обрыва стержней)	При обрыве одного стержня	При обрыве двух стержней	При обрыве трех стержней
20	22	26	34

По результатам таблицы 10 можно судить о том, что диагностическая система способна распознать аварийное состояние.

Для защиты от ложных срабатываний системы диагностики, предусмотрен следующий алгоритм (рисунок 27):

1. Фиксируется определенное пороговое значение, при котором сработает сигнал об аварии.
2. Если сигнал аварии сохраняется на определенном временном участке, то это говорит о изменении состоянии асинхронного двигателя.

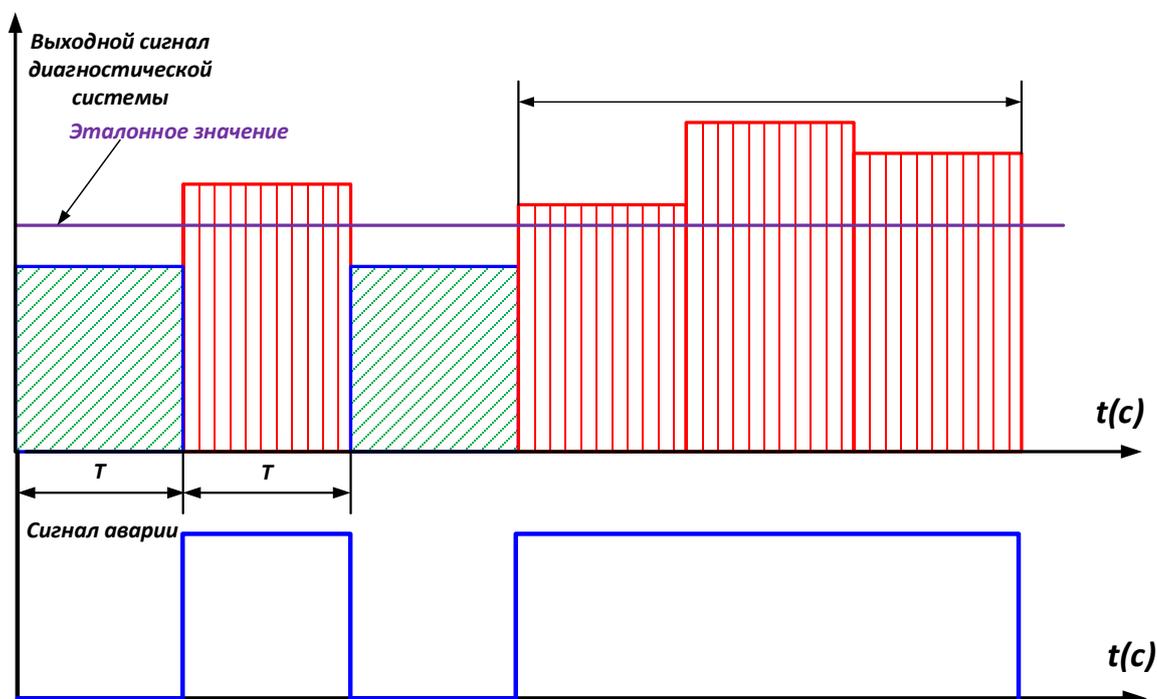


Рисунок 27 – Алгоритм защиты от ложных срабатываний

### 3.4 Выводы

1. Экспериментальная установка позволила исследовать работоспособность разрабатываемой диагностической системы в основных эксплуатационных режимах АД.
2. Проведенные эксперименты показали, что огибающая токов статора содержит диагностический признак, позволяющий с определенной точностью определить обрыв стержня в роторе.
3. Предложенная модель диагностической системы на базе КИХ фильтра способна распознать аварийное состояние двигателя и защищена от ложных срабатываний.

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

### **4.1 Цели проекта**

Темой научно-технического исследования является разработка системы диагностики повреждений ротора в асинхронном двигателе с короткозамкнутой обмоткой.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

### **4.2 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ**

#### **4.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы,

для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В данном случае сегментирование целесообразно провести по методам диагностики повреждения стержней ротора.

А также следует выделить сегменты рынка:

- применяющие способы ремонтного контроля;
- способы и устройства тестовой диагностики;
- способа и устройства функциональной диагностики.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 11.

Таблица 11 – Сегментирование коммерческих организаций по видам деятельности

	Методы с остановкой и разбором двигателя	Методы с остановкой двигателя и установкой датчиков внутри конструкции двигателя	Методы без выведения машины из эксплуатации и установки датчиков внутри конструкции двигателя
Способы ремонтного контроля			
Способы и устройства тестовой диагностики			
Способы и устройства функциональной диагностики			

Результаты сегментирования:

- основными сегментами рынка являются все виды деятельности связанные с диагностикой повреждения стержней ротора;
- так как способы ремонтного контроля и способы и устройства тестовой диагностики не могут проводиться без выведения машины из эксплуатации - предприятие по большей части должно быть ориентировано на сегменты рынка, связанные со способами функциональной диагностики повреждений;
- наиболее привлекательными сегментами рынка являются способы и устройства функциональной диагностики, использующие методы без выведения машины из эксплуатации и установки датчиков внутри конструкции двигателя.

## 4.2.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 12, подобраны, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Информативность	0,26	5	3	4	1,3	0,78	1,04
2. Чувствительность	0,16	5	4	4	0,8	0,64	0,64
3. Надежность	0,07	4	5	3	2,8	3,5	2,1
4. Точность	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
5. Безопасность	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
2. Цена	0,12	4	4	4	0,48	0,48	0,48
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
Итого	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36

Итоговый вес показателей должны составлять 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

где: К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$\text{Б}_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Основываясь на проведенном анализе конкурентов, можно сказать, что проект превосходит конкурентные исследования, что связано с точностью привода и предполагаемым сроком эксплуатации. Однако конкурентоспособность у выбранных объектов достаточно высока.

### 4.2.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT - анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в 3 этапа.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде (таблица 13).

Таблица 13 – Матрица SWOT

<p><b>Сильные стороны проекта:</b>  С1. Возможность использования в основных эксплуатационных режимах АД  С2. Надежность технологии  С3. Однозначность выявления дефектов  С4. Квалифицированный персонал  С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.  Сл2. Аварийность  Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Повышение работоспособности диагностируемого привода  В2. Повышение производительности  В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p><b>Угрозы:</b>  У1. Риск несвоевременной поставки оборудования  У2. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции  У3. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>

Второй этап – выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды, что поможет выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 14. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	-	+	+
	B2	+	+	-	-	+
	B3	+	-	0	0	-
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3		
	B1	-	-	+		
	B2	-	-	-		
	B3	+	-	-		
Сильные стороны проекта						
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	0	0	-
	У2	+	0	+	-	0
	У3	-	-	0	0	+
Слабые стороны проекта						
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3		
	У1	-	-	+		
	У2	-	-	-		
	У3	+	-	-		

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 15.

Таблица 15 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>                  С1. Возможность использования в основных эксплуатационных режимах АД                  С2. Надежность технологии                  С3. Однозначность выявления дефектов                  С4. Квалифицированный персонал                  С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>                  Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.                  Сл2. Аварийность                  Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p><b>Возможности:</b>                  В1. Повышение работоспособности диагностируемого привода                  В2. Повышение производительности                  В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p>Дополнительный спрос может появиться за счет возможности использования в различных режимах АД</p>	<p>Отсутствие квалификационных кадров и потенциальных потребителей может усложнить процесс эксплуатации.</p>
<p><b>Угрозы:</b>                  У1. Риск несвоевременной поставки оборудования                  У2. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции                  У3. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>	<p>Создание конкурентоспособного проекта.</p>	<p>Внедрение данного проекта сильно зависит от экономической ситуации.</p>

#### 4.2.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполнена специальную форму, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 16).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 16 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	2
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
67	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
8	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
9	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
10	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
11	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
12	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
13	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
14	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
15	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5

16	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	55	55

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где:  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет оценить готовность научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

Выявлены слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной разработки проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

#### 4.2.5 Методы коммерциализации

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

### 4.3 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В таблице 17 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 17 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка диагностической системы повреждения стержней ротора асинхронного двигателя
Ожидаемые результаты проекта:	Разработанная система позволяет выявить повреждения на ранней стадии.
Критерии приемки результата проекта:	Возможность производства автоматического диагностирования без вывода АД из работы
Требования к результату проекта:	Рассмотрены виды неисправностей АД мощностью до 400кВт.
	Рассмотрены математические модели АД в двухфазной и многофазной системе координат.
	Выявлены диагностические признаки обрыва стержней
	Разработана диагностическая система и проведено исследование для выявления повреждений в роторной цепи

В таблице 18 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 18 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1.	Тимошкин В. В., НИ ТПУ, доцент ИШЭ	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения.	112
2.	Ефименко Р.С., магистрант ИШЭ	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, проведение расчета, моделирования, анализ полученных	270

			результатов, написание работы	
ИТОГО:				382

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (таблица 19).

Таблица 19 – Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения/ допущения</b>
Бюджет проекта	923 523
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта:	01.09.2021-20.06.2022
Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2021
Дата завершения проекта	12.06.2022

### **4.3 Планирование управления научно-техническим проектом**

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

#### **4.3.1 Иерархическая структура работ проекта**

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 28).



Рисунок 28 – Иерархическая структура работ

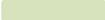
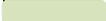
#### 4.3.2 План проект

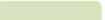
В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблицы 20 и 21).

Таблица 20 – Календарный план проекта

Название	Длит- сть, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.21	07.09.21	Руководитель
Согласование плана работ	1	08.09.21	09.09.21	Руководитель и исполнитель.
Изучение основных видов неисправностей АД и требований к диагностическим системам	17	10.09.21	07.10.21	Исполнитель.
Анализ математических моделей АД в двухфазные и многофазной системы координат	21	08.10.21	29.10.21	Исполнитель.
Выявление диагностического признака	21	30.10.21	19.11.21	Руководитель и исполнитель.
Разработка и исследование диагностической системы выявления повреждений роторной цепи	139	20.11.21	08.04.2022	Руководитель и исполнитель.
Обобщение и оценка результатов	35	09.04.22	14.05.2022	Руководитель и исполнитель
Составление пояснительной записки	28	15.05.22	12.06.22	Исполнитель
Итого:	270			

Таблица 21 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2021					2022					
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	
Утверждение темы магистерской диссертации	7											
Согласование плана работ	1	 										
Изучение основных видов неисправностей АД и требований к диагностическим системам	17											
Анализ математических моделей АД в двухфазной и многофазной систем координат	21											
Выявление диагностического признака	21											
Разработка и исследование диагностической системы выявления повреждений роторной цепи	139											
Обобщение и оценка результатов	35								 			
Составление пояснительной записки	28											

 Руководитель  Исполнитель

#### 4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- Специальное оборудование
- Заработную плату исполнителей технического проекта
- Отчисления во внебюджетные фонды
- Накладные расходы

В настоящую смету включается основная и дополнительная заработные платы научных и инженерно-технических работников, отчисления во внебюджетные фонды, материальные и накладные расходы,

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования и программного обеспечения необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 22).

Таблица 22 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (НР)	1	47 000,0	47 000,0
2	Программный пакет MicrosoftOffice	1	5 190,0	5190,0
3	MathCad	1	7818	7818
<b>Итого, руб.:</b>				<b>60008</b>

##### 4.4.1 Основная заработная плата

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая

ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 23.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:  $Z_{zn} = Z_{осн} + Z_{доп}$ ,

где,  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-15 % от  $Z_{осн}$ ).

Величина расходов по основной заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок:  $Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_t + Z_d + Z_{рк}}{F_d},$$

где  $Z_t$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$Z_d$  – доплата за руководство расчетнопроектирования;

$Z_{рк}$  – доплата с учетом районного коэффициента  $K_{рк}=1,3$  (для Томска).

$F_d$  – фонд рабочего времени персонала, раб.дн.

Таблица 23 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	$Z_t$ , руб	$Z_{доп}$ , руб	$Z_{рк}$ , руб	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб	$T_p$ , дн	$Z_{осн}$ , руб	$Z_{доп}$ , руб	
Руководитель	36540	730,8	11181,24	48452,04	2559,5	112	286668,2	43000,23	
Исполнитель	14100		4230	18330	968,3	270	261442,2	39216,32	
<b>ИТОГО</b>								548110,3	82216,55

#### 4.4.2 Отчисления во внебюджетные фонды

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

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), для Томского Политехнического Университета равный 30%+ 0,2% учитывающие травматизм.

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 329668,4 = 99559,85 \text{ руб.}$$

#### **4.4.3 Накладные расходы**

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

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,16 \cdot (548110,3 + 82216,55) = 100852,3$$

где  $k_{накл}$  – коэффициент накладных расходов принят 0,16.

#### **4.4.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 24.

Таблица 24 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Структура затрат, %
Специальное оборудование	60008	6,74
Основная заработная плата	548110,3	61,53
Дополнительная заработная плата	82216,5	9,23
Отчисления во внебюджетные фонды	99559,9	11,18
Накладные расходы	100852,3	11,32
Бюджет затрат НТИ	890747	100

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят 890747рублей, из которых большую часть (61,53 %) составят затраты по заработной плате исполнителей проекта.

#### 4.5 Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры. Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 29.

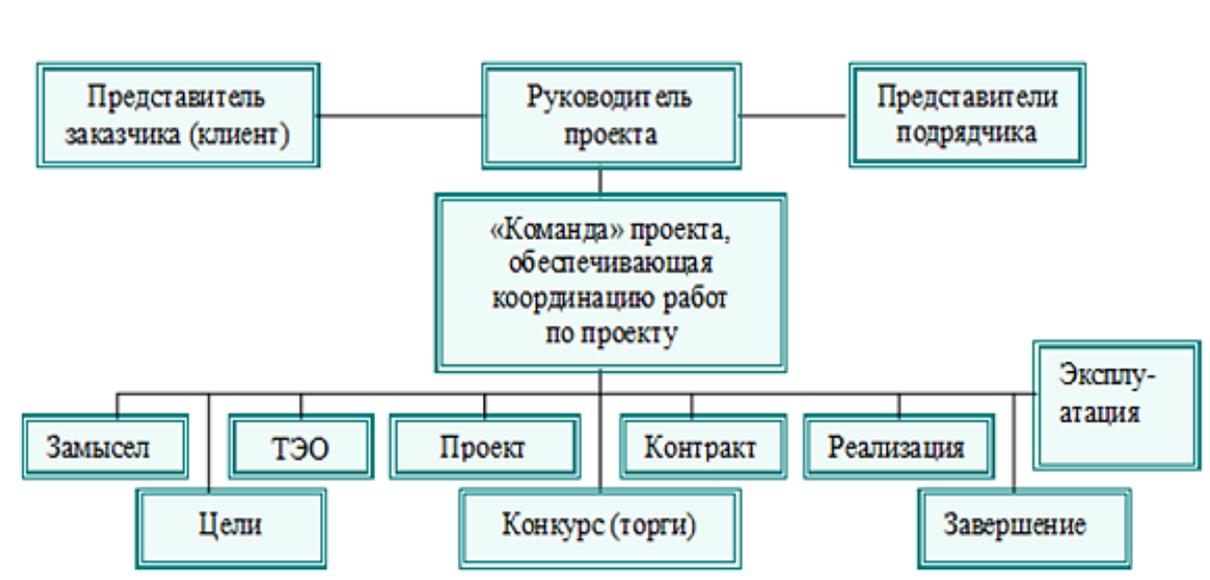


Рисунок 29 – Проектная организационная структура проекта

#### 4.5.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 25).

Таблица 25 – План управления коммуникациями

Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информацию
Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

#### 4.5.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 26.

Таблица 26 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неточность метода анализа	2	5	Низкий	Внешний и внутренние анализы	Низкая точность метода анализа
2	Неточность модели	2	4	Средний	Учет допущений	Особенность программ
3	Отсутствие интереса к результатам исследования	2	5	Низкий	Привлечение предприятий, публикация результатов	Отсутствие результатов исследования

## 4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

### 4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности используются следующие основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

*Чистая текущая стоимость (NPV)* – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{ont}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: ЧДП<sub>онт</sub> – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

$I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

$t$  – номер шага расчета ( $t = 0, 1, 2 \dots n$ )

$n$  – горизонт расчета;

$i$  – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 27. При расчете рентабельность проекта составляла 20 - 25 %, норма амортизации – 10 % от бюджета.

Таблица 27 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	1068896,4	1068896,4	1068896,4	1068896,4
2	Итого приток, руб.	0	1068896,4	1068896,4	1068896,4	1068896,4
3	Инвестиционные издержки, руб.	890747	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб. (35% от бюджета)	0	276131,6	276131,6	276131,6	276131,6
5	Налогооблагаемая прибыль (1-4)	0	792764,9	792764,9	792764,9	792764,9
6	Налоги 20 %, руб. (5*20%)	0	158553	158553	158553	158553*0
8	Чистая прибыль, руб. (5-6)	0	634211,9	634211,9	634211,9	634211,9
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб. (чистая прибыль + амортизация)	-890747	723286,6	723286,6	723286,6	723286,6
10	Коэффициент дисконтирования при $i=25%$ (КД)	1	0,833	0,694	0,579	0,482
11	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб. (9*10)	-890747	602738,8	502282,4	418568,6	348807,2
12	$\sum$ ЧДД	1 872 397 руб.				
12	Итого NPV, руб.	981 650 руб.				

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 981 650 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

**Индекс доходности (PI)** – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0 = 2,1$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

$I_0$  – начальный инвестиционный капитал, руб.

Проект является эффективным.

*Внутренняя ставка доходности (IRR)*. Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или 10. По разности между IRR и ставкой дисконтирования  $i$  можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования  $i$ , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования ( $i$ ) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 28 и на рисунке 30.

Таблица 28 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	-890747,0	723286,6	723286,59	723286,59	723286,59	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	-890747	657467,5	597434,7	543188,2	494004,7	1401348,2
	0,2	-890747	602497,7	501960,9	418059,6	348624,1	980395,4
	0,3	-890747	556207,4	428185,7	329095,4	253150,3	675891,7
	0,4	-890747	516426,6	368876,2	263276,3	188054,5	445886,6
	0,5	-890747	482432,2	321139,2	213369,5	143210,7	269404,7
	0,6	-890747	452054,1	282081,8	176481,9	110662,8	130533,6
	0,7	-890747	425292,5	242301	146827,2	81008,1	4681,8
	0,8	-890747	402147,3	223495,6	123682	68712,2	-72709,9
	0,9	-890747	380448,7	200350,4	105599,8	55693,1	-148655,0
	1,0	-890747	361643,3	180821,6	90410,8	44843,8	-213027,5

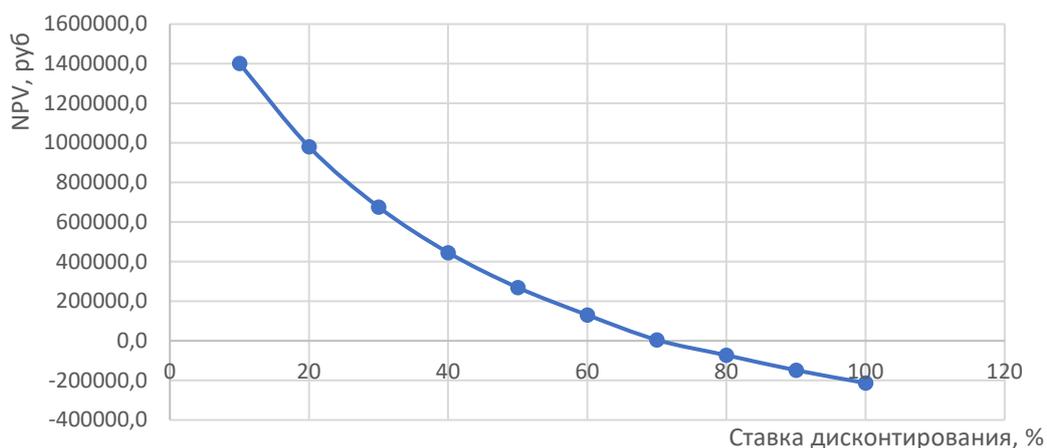


Рисунок 30 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,7 -> проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта:  $70\% - 25\% = 45\%$

*Дисконтированный срок окупаемости.* Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени. Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 29).

Таблица 29 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ( $i=0,25$ ), руб.	-890747,0	602738,8	502282,4	418568,6	348807,2
2	То же нарастающим итогом, руб.	-890747,0	-288008,2	214274,1	632842,8	981650
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DP_{диск} = 1 + (288008,2 / 502282,4) = 1,57$ года				

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 30).

Таблица 30 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие методики математического определения токов АД при повреждении стержней роторов	Предложена методика определения токов в обмотках АД при повреждении стержней короткозамкнутой обмотки ротора.
Отсутствие имитационной модели АД с возможностью расчета токов с высокой точностью	Представлена имитационная модель АД, созданная в прикладном программном пакете Matlab/Simulink, обеспечивает расчет токов в обмотках АД с погрешностью порядка 10 %.

#### 4.6.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где:  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 31.

Таблица 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

<b>ПО</b> <b>Критерии</b>	<b>Весовой коэффициент параметра</b>	<b>Текущий проект</b>	<b>Аналог 1</b>	<b>Аналог 2</b>
1. Информативность	0,32	5	3	4
2. Чувствительность	0,3	5	4	4
3. Надежность	0,1	4	5	3
4. Точность	0,18	5	4	3
5. Безопасность	0,1	5	5	5
<b>Итого</b>	1	24	21	19

$$I_m^p = 5 \cdot 0,32 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,1 = 4,9$$

$$I_1^A = 3 \cdot 0,32 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,1 = 3,88$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,32 + 4 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,1 = 3,82$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{финр}^p$  и аналога  $I_{финр}^a$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где:  $\mathcal{E}_{ср}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{финр}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 32.

Таблица 32 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,50	0,45	0,60
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,90	3,88	3,82
3	Интегральный показатель эффективности	9,80	8,62222	6,37
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	1,11	0,83

### **Выводы по разделу «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 981650 руб.; индекс доходности  $PI=2,1$ , внутренняя ставка доходности  $IRR=70\%$ , срок окупаемости  $DPP_{дск}=1,57$  года.

Таким образом, проект является ресурсоэффективным с высоким запасом финансовой прочности и достаточно коротким сроком окупаемости.

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследования является разработка методики диагностики повреждений в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором. С целью применения на установках промышленных предприятий и электростанций.

Магистерская диссертация проводится с использованием персонального компьютера в офисном помещении. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования осуществляются при помощи моделирования в программной среде MATLAB – Simulink.

В настоящем разделе рассматриваются вопросы охраны труда и техники безопасности при работе в офисах, разрабатываются мероприятия по предотвращению воздействия опасных и вредных факторов на здоровье работников и создание безопасных условий труда.

### 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения

Законодательством РФ регулируются отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, социальных отношений, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и др.

Работа в офисе относится ко второй категории тяжести труда – работы выполняются при оптимальных условиях внешней производственной среды и при оптимальной величине физической, умственной и нервно-эмоциональной нагрузки.

Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов [64].

Рабочие места, оборудованные персональными компьютерами, должны располагаться по отношению к световым проемам таким образом, чтобы естественный свет падал с боковой стороны, преимущественно слева [65].

Рабочий стол может быть любой конструкции, которая отвечает современным требованиям эргономики и позволяет удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. Целесообразно применение столов, имеющих отдельную от основной столешницы специальную рабочую поверхность для размещения клавиатуры. В случае, когда используется стол с нерегулируемой высотой рабочей поверхности, его высота должна быть в пределах от 680 до 800 мм. Глубина рабочей поверхности стола должна составлять 800 мм, ширина – 1600 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм, на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула или кресла должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы работника и позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины.

Рабочий стул или кресло должны быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [66].

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной поверхности, отделенной от основной столешницы [67].

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм [66].

## 5.2 Производственная безопасность при разработке проектного решения

Производственная безопасность является системой организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных и производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня.

Необходимо определить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникнуть при обслуживании и эксплуатации разработки. Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003 – 2015. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для данной производственной среды приведен в таблице 33.

Таблица 33 - Возможные опасные и вредные факторы на рабочем месте при разработке проектного решения

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [68] ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений [69] ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [70]
2. Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [71]
3. Повышение уровня вибрации	ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования [72] ГОСТ 12.4.002-97 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний [73]

4. Повышение уровня шума	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [74] СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1) [75]
5. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [76] ГОСТ 12.1.009-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения [77] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое) [78] ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление [79]

### 5.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов

#### 1. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточная освещенность рабочей зоны может возникать при неправильном размещении источников света и осветительных приборов в рабочем помещении, а также при световом потоке ниже нормы в 300 лк [68].

Свет влияет на физиологическое состояние человека, правильно организованное освещение стимулирует протекание процессов высшей нервной деятельности и повышает работоспособность. При недостаточном освещении человек работает менее продуктивно, быстро устает, растет вероятность ошибочных действий, что может привести к травматизму. В зависимости от длины волны, свет может оказывать возбуждающее (оранжево-красный) или успокаивающее (желто-зеленый) действие.

Минимальная освещенность на рабочих местах не должна отличаться от нормируемой средней освещенности в помещении более чем на 10% согласно. Средняя освещенность на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должна быть не менее 200 лк, пункт 4.2 в [69].

Согласно пункту 1.2. в [70] к средствам нормализации освещенности производственных помещений и рабочих мест относятся:

- источники света;
- осветительные приборы;
- световые проемы;
- светозащитные устройства;
- светофильтры;

## 2. Отклонение показателей микроклимата

Отклонение показателей микроклимата могут возникать при несоответствии температуры воздуха и рабочих поверхностей, относительной влажности воздуха и скорости его движения оптимальным или допустимым величинам, в зависимости от теплого или холодного периода года.

Микроклимат производственных помещений, в основном, влияет на тепловое состояние организма человека и его теплообмен с окружающей средой [71].

Недостаточная влажность приводит к интенсивному испарению влаги со слизистых оболочек, их пересыханию и эрозии, загрязнению болезнетворными микробами.

Длительное влияние высокой температуры в сочетании со значительной влажностью может привести к накоплению тепла в организме и к гипертермии – состоянию, при котором температура тела повышается до 38-40°С. При гипертермии, и как следствие, тепловом ударе, наблюдается головная боль, головокружение, общая слабость, изменение цветового восприятия, сухость во рту, тошнота, рвота, потовыделение.

При низкой температуре, значительной скорости и влажности воздуха возникает переохлаждение организма (гипотермия). При длительном воздействии холода дыхание становится неритмичным, частота и объем вдоха растут, изменяется углеводный обмен. Вследствие воздействия низких температур могут возникнуть холодовые травмы.

Влажность воздуха оказывает большое влияние на терморегуляцию организма. Повышенная влажность затрудняет терморегуляцию вследствие снижения испарения пота, а слишком низкая влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Движение воздуха в помещениях является важным фактором, влияющим на самочувствие человека. В жарком помещении движение воздуха способствует увеличению отдачи тепла организмом и улучшает его состояние, но оказывает неблагоприятное воздействие при низкой температуре воздуха в холодное время года.

Микроклимат рабочих помещений должен обеспечивать общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и не вызывать отклонений в состоянии здоровья.

Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на производственных предприятиях указаны в таблице 34 и 35 соответственно согласно [71].

Таблица 34 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Средней тяжести Па	18-20	40-60	0,2
Теплый	Средней тяжести Па	21-23	40-60	0,3

Таблица 35 - Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
		Верхняя граница	Нижняя граница		
Холодный	Средней тяжести Па	23-24	17-15	40-60	0,3
Теплый	Средней тяжести Па	27-29	18-17	40-60	0,2-0,4

### 3. Повышенный уровень вибраций

Одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов является вибрация. Под вибрацией понимается колебание твердых тел. Источниками вибрации в жилых и общественных зданиях являются инженерное и санитарно-техническое оборудование, а также промышленные установки и транспорт (тяжелые грузовые автомобили, железнодорожные поезда, трамваи), создающие при работе большие динамические нагрузки, которые вызывают распространение вибрации в грунте и строительных конструкциях зданий.

Большое негативное воздействие этот фактор оказывает на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Длительное воздействие вибрации на организм приводит к развитию профессиональных заболеваний, основным из которых является – виброболезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве.

Большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к собственным частотам внутренних органов человека [72].

При работе с ручным механизированным и пневматическим инструментом применяются средства индивидуальной защиты рук от вибрирующих объектов. К ним относятся антивибрационные рукавицы с поролоновыми прокладками или наладонниками из резины.

Для изоляции рабочих от вибрирующего пола применяют специальную обувь на антивибрационной подошве; резино-войлочные маты; антивибрационные площадки; антивибрационные сидения.

В целях профилактики развития вибрационной болезни для работающих с вибрирующим оборудованием регламентируется режим работы – продолжительность рабочей смены, обязательные перерывы, отдых [73].

### 4. Повышенный уровень шума

Шум - один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источники шума на рабочем месте: элементы офисного оборудования, транспортные средства, системы вентиляции с механическим побуждением [74].

Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности. Для защиты от шума по [75] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 36, согласно пункту 6.3 в [76].

Таблица 36 - Предельно допустимые уровни шума

Назначение помещения или территории	Уровни звукового давления, дБ.									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения офисов, рабочие помещения и кабинеты проектных и научно-исследовательских организаций	86	71	61	54	49	45	42	40	38	65
Помещения с постоянными рабочими местами производственных предприятий	102	90	82	77	73	70	68	66	64	90

## 5.2.2 Расчет системы искусственного освещения

В кабинетах и офисных помещениях должен соблюдаться необходимый уровень естественного освещения, для улучшения работоспособности и сохранения здоровья персонала. Для этого устанавливаются нормативные уровни освещенности, которые описаны в документе СП 52.13330.2016, уровни представлены в таблице 37 [68]

Таблица 37 – Уровни освещённости рабочей зоны

Место, площадка	Плоскость, в которой нормируется освещенность	Освещенность рабочей поверхности, лм
Кабинеты и рабочие комнаты, офисы	горизонтальная	500

Произведём расчёт освещения офисного помещения. Кабинет имеет следующие размеры: длина  $A = 5$  м, ширина  $B = 4$  м, высота  $H = 2,2$  м. Высота рабочей поверхности  $h_{pn} = 0,8$  м. Коэффициент отражения стен  $\rho_c = 50\%$ , потолка  $\rho_n = 70\%$ . Коэффициент запаса  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ .

Для дальнейшего расчета необходимо выбрать тип светильника и мощность ламп.

Основные характеристики некоторых светильников с люминесцентными лампами представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Основные характеристики некоторых светильников с люминесцентными лампами

Тип светильника	Количество и мощность лампы	Область применения	Размеры, мм			КПД, %
			Длина	Ширина	Высота	
ОД – 2-30	2×30	Освещение	933	204	156	75
ОД – 2-40	2×40	производственных помещений с нормальными условиями среды	1230	266	158	75
ОД – 2-80	2×80		1531	266	198	75
ОД – 2-125	2×125		1528	266	190	75
ОДО – 2-40	2×40		1230	266	158	75
ОДОР – 2-30	2×30		925	265	125	75
ОДОР – 2-40	2×40		1227	265	155	75
АОД – 2-30	2×30		945	255	-	80
АОД – 2-40	2×40		1241	255	-	80
ШОД – 2-40	2×40		1228	284	-	85

Основываясь на таблице 38, выбираем тип светильников ОД – 2-30, с мощностью лампы 30 Вт.

Далее произведем расчет высоты подвеса светильников:

Высоту свеса светильников принимаем  $h = 0,5$  м.

$$h_n = H - h_c = 2,2 - 0,5 = 1,7 \text{ м.}$$

Полученное значение корректно, так как меньше нормативного значения допустимой высоты подвеса светильников с люминесцентными лампами, которое составляет 4 метра для двухламповых светильников ОД, ОДР, ОДО, ОДОР при непрерывных рядах из сдвоенных светильников.

Определим расчетную высоту:

$$h = H - h_c - h_{pn} = 2,2 - 0,5 - 0,8 = 0,9 \text{ м.}$$

Далее необходимо рассчитать расстояние между рядами светильников, расстояние от стены до торца светильника:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 0,9 = 0,99 \text{ м.} - \text{расстояние между светильниками.}$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L/3 = 0,403 \text{ м. и } \frac{5 - (0,5 + 0,5 + 0,933 + 0,933 + 0,933)}{2} = 0,600 \text{ м.}$$

Расстояние между светильниками в ряду принимаем 0,5 м.

Далее определим общее число ламп в осветительной системе:

Количество рядов определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3} \cdot L)}{L} + 1 = \frac{(4 - \frac{2}{3} \cdot 0,99)}{0,99} + 1 = 4,37 \approx 4$$

Количество ламп в ряду определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3} \cdot L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{(5 - \frac{2}{3} \cdot 0,99)}{0,933 + 0,5} = 3$$

Общее количество ламп:

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} = 4 \cdot 3 = 12$$

Далее произведем расчет индекса помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5 \cdot 4}{0,9 \cdot (5 + 4)} = 2,47$$

В таблице 39 представлены коэффициенты использования светового потока светильников с люминесцентными лампами.

Таблица 39 – Коэффициенты использования светового потока светильников с люминесцентными лампами

Тип светильника	ОД и ОДЛ			ОДР			ОДО			ОДОР			Л71Б03		
	$\rho_n, \%$	$\rho_c, \%$	$i$	$\rho_n, \%$	$\rho_c, \%$	$i$	$\rho_n, \%$	$\rho_c, \%$	$i$	$\rho_n, \%$	$\rho_c, \%$	$i$	$\rho_n, \%$	$\rho_c, \%$	$i$
	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70
	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	Коэффициенты использования, %														
0,5	23	26	31	21	24	28	21	25	30	18	21	26	14	16	19
0,6	30	33	37	27	30	34	27	31	36	23	27	32	18	20	22
0,7	35	38	42	32	35	38	32	36	41	27	31	35	21	23	25
0,8	39	41	45	35	37	41	36	39	44	30	33	38	23	25	27
0,9	42	44	48	38	40	43	39	42	46	32	36	40	25	27	29
1,0	44	46	49	40	42	45	41	44	48	34	38	42	26	28	30
1,1	46	48	51	41	43	46	42	46	50	36	39	43	27	29	31
1,25	48	50	53	43	45	48	44	48	52	38	41	45	29	30	32
1,5	50	52	56	45	48	51	46	50	55	40	43	47	30	31	34
1,75	52	55	58	47	50	53	49	52	58	42	45	50	31	33	35
2,0	55	57	60	50	52	54	51	55	60	43	47	52	33	34	36
2,25	57	59	62	52	54	56	53	57	62	45	49	54	34	35	37
2,5	59	61	64	53	55	58	55	58	64	47	50	56	35	36	39
3,0	60	62	66	54	56	60	56	60	66	48	52	58	36	37	40

Из таблицы принимаем индекс помещения  $i = 2,5$ , коэффициент использования 56%.

Произведем расчет светового потока:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{\eta} = \frac{500 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,64} = 2148 \text{ лм.}$$

Стандартное значение для данных ламп 2020лм, произведем проверку:

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

$$-10\% \leq \frac{2020 - 2148}{2020} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$-10\% \leq -6,3 \leq +20\%$$

Отклонение в допустимых пределах, расчет выполнен корректно.

Определим мощность осветительной системы:

$$P = 15 \cdot 2 \cdot 30 = 900 \text{ Вт.}$$

Согласно проведенным измерениям, рассчитанная система способна обеспечить уровень искусственного освещения в 500 лм.

На рисунке 31 приведена схема размещения светильников в помещении для люминесцентных ламп в масштабе 1:25, согласно всем проделанным ранее расчетам и выбору оборудования.

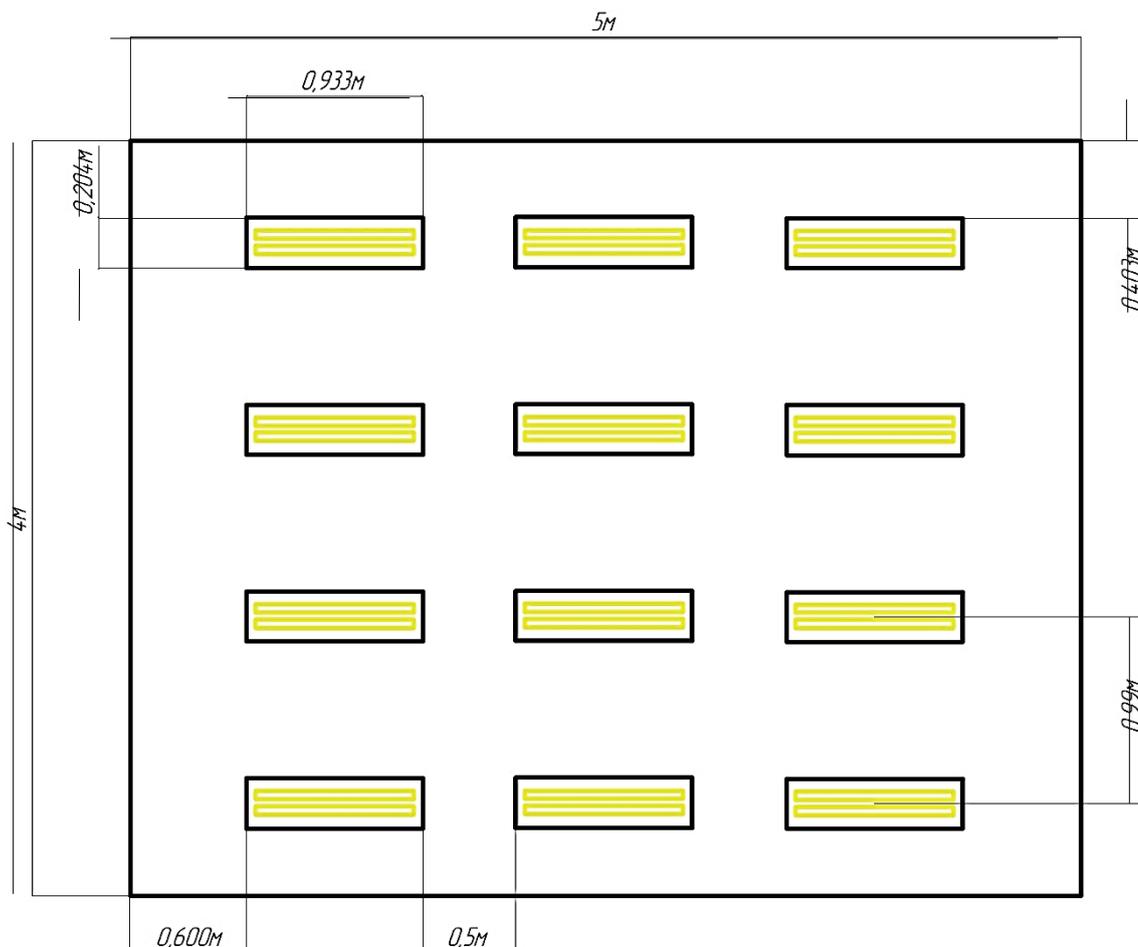


Рисунок 31 - Схема размещения светильников в помещении для люминесцентных ламп в масштабе 1:25

### 5.2.3 Анализ опасных факторов

Поражение электрическим током

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий, а также средств, обеспечивающих защиту людей от

вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества [76].

В помещении офиса имеются приборы: компьютеры, принтеры, телефон, чайник, сканер, микроволновка и кондиционер, которые работают от сети и представляют собой опасность поражения электрическим током. Поражение проявляется в парализующем и разрушительном воздействии тока на внешние и внутренние органы – кожный покров, мышцы, органы дыхания, сердце, нервную систему [77].

При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- требования к электрооборудованию;
- анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током [78].

Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и ее непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение [79].

### **5.3 Экологическая безопасность при разработке проектного решения**

Деградация городских почв – это уничтожение плодородного слоя почвы, частичное или полное разрушение почвенного покрова, сопровождающееся ухудшением его физического и биологического состояния, снижением плодородия.

Сохранить фонд почв возможно при его правильной эксплуатации. При строительстве плодородный слой почвы должен сниматься и рационально использоваться. Затраты на обращение с плодородным слоем должны входить в стоимость строящихся объектов. Зеленые насаждения также частично смогут помочь в восстановлении естественного природного комплекса территории, на которой производилось строительство.

Потребительские свойства воды обусловили ее широкое использование на всех этапах исследования, в том числе и на этапе разработки проектного решения.

Для контроля и значительной экономии воды стоит организовать технический учет воды. Такой учет позволяет грамотно планировать потребление, выявлять нерациональное использование, а также снижать потери воды на основе анализа учетных данных. Также рекомендуется более осознанно подходить к использованию водопроводных ресурсов (закрывать кран при намыливание рук или посуды) и контролировать сантехнические системы на наличие протечек.

Коэффициент полезного действия электростанций составляет 30-60%, от значения КПД зависит объем излишне выработанной энергии, которая не будет использована, а перейдет в атмосферу с отходящими газами. Также, в атмосферу переходят и золы, образующиеся при сгорании топлива на тепловых электроцентралях. Золой являются источниками атмосферной пыли и содержат в своем составе углерод, углеводороды в виде смол и масел и неорганические соединения.

Уменьшить воздействие этих видов загрязнений можно путем установки на ТЭЦ современного очистного оборудования. Например, каталитические нейтрализаторы позволяют снизить концентрацию пыли и вредных веществ, попадающих в атмосферу. Снижения теплового загрязнения можно достичь путем проектирования более высоких труб на электростанциях, таким образом паровые массы будут успевать лучше охлаждаться

## 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Пожар (загорание) как источник ЧС

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно, пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м<sup>3</sup>.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действия администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

**Вывод по разделу «социальная ответственность»:**

В данной работе были рассмотрены следующие проблемы:

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- организация труда на рабочем месте.

Проблемы производственной безопасности:

- уменьшение влияние вредных факторов на сотрудников (шум, вибрация, недостаточная освещенность рабочей зоны, отклонение показателей микроклимата);

- предотвращение электро-поражения персонала.

Вопросы экологической безопасности:

- Воздействие на литосферу: деградация и уплотнение почвенного покрова (здание и подземные коммуникации);

- Воздействие на гидросферу: использование водных ресурсов, подведение воды и водоотведение, отопление, мытье рук;

- Воздействие на атмосферу: загрязнения пылью и газами, тепловое загрязнение атмосферного воздуха.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях:

- предотвращение ЧС.

На основании чего на предприятии могут быть приняты решения по исключению вышеперечисленных проблем, путем внедрения необходимой аппаратуры в соответствии с проблемой, оптимизирована работа персонала и установок, введена необходимая защита. Также, в работе были предложены меры по защите окружающей среды, предотвращению пожаров.

Фактическое значения показателя освещенности рабочей зоны оказалось ниже нормативного 500лм, согласно [СП 52.13330.2016], что не соответствует норме. Был произведен расчет системы искусственного освещения для устранения этого отклонения [68].

Фактические значений показателей микроклимата корректны и находятся в допустимых пределах, указанных в [ГОСТ 12.1.005-88] [71].

Фактические значения показателей уровня вибрации оказались ниже предельно допустимых значений производственной локальной вибрации, указанных в [ГОСТ 12.1.012-90] [72].

Фактические значения показателей уровня шума на рабочем месте соответствуют нормативным значениям 65дБА для напряженности легкой степени при легкой физической нагрузке, уровень шума в рассматриваемом производственном помещении не превышает допустимых норм, указанных в [СП 51.13330.2011] [75].

Исходя из всего вышеописанного и, в соответствии с [Правила устройства электроустановок (ПУЭ)], можно заключить, что данное офисное помещение можно отнести к первой категории помещений по электробезопасности [78].

В соответствии с [Приказ Минтруда России от 15.12.2020 N 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок"], для того, чтоб проводить работы с рассматриваемой в данной работе установкой, персонал должен иметь первую группу по электробезопасности [80].

В соответствии с [СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"], категория тяжести труда определяется как вторая [81].

В соответствии с [СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»], рассматриваемое помещение по критерию взрывопожарной и пожарной опасности можно отнести к категории ВЗ – пожароопасность [82]

В соответствии с [Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 N 2398 (ред. от 07.10.2021) "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий"], рассматриваемый объект можно отнести к четвертой категории объектов, оказывающих минимальное негативное воздействие на окружающую среду [83].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации решена важная научно-техническая задача, связанная с повышением эксплуатационной надежности электроприводов на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие основные результаты и выводы:

1. Одним из наиболее уязвимых узлов асинхронных двигателей является короткозамкнутый ротор. Обрыв стержней ротора может вызвать вибрацию, несимметрию токов ротора и статора, увеличение потребления энергии из сети и возможные дальнейшие повреждения, что влечет опасность для обслуживающего персонала. Повреждение стержней ротора наносит значимый экономический ущерб, который проявляется в повышенном энергопотреблении, из этого следует, что разработка диагностической системы имеет существенный экономический эффект, определяемый суммой предотвращенного ущерба.

2. Представление математической модели АД в  $m$  – фазной системе координат позволяет максимально достоверно описать физические процессы в статорных обмотках при повреждении «беличьей клетки» ротора. Данная модель была разработана и успешно протестирована в программной среде Matlab Simulink.

3. Экспериментально выявлено, что кривая модуля огибающей токов статора изменяет свою форму в зависимости от количества исключенных из расчетов стержней ротора математической модели и позволяет выявить диагностический признак, который характеризует состояние электродвигателя.

6. Разработана и смоделирована система диагностики на базе КИХ фильтра, позволяющая распознать аварийное состояние двигателя. А также, предложен алгоритм настройки от ложных срабатываний.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT анализа,

определен полный перечень работ, а так же трудоемкость на их проведение. Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, вопросы производственной и экологической безопасности, а так же действия при чрезвычайных ситуациях. Проведен анализ вредных и опасных производственных факторов, определены меры предотвращения этих факторов. Проанализировано влияние объекта на окружающую среду, определены меры по обеспечению экологической безопасности. Рассмотрен вопрос по обеспечению безопасности в случае чрезвычайной ситуации, предложены методы по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайной ситуации.

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Забудский Е. И. 3 12 Электрические машины. Асинхронные машины: учебное пособие для вузов / Е. И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2017. – Ч. 2. – 304с.
2. Глазырина Т.А. Совершенствование функциональной диагностики повреждений короткозамкнутой обмотки асинхронных двигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – ТПУ, 2012. – 120 с.
3. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. В 2-х т. Т. 1. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 654 с.
4. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 349 с.
5. Копылов, И.П. Электрические машины: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – 4-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2004. – 607 с.
6. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник для среднего профессионального образования / М.М. Кацман. – 7-е изд., стер. - М.: Академия, 2007. – 492 с.
7. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины: Учебное пособие / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 527 с.
8. Токарев, Б.Ф. Электрические машины: Учебное пособие / Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
9. Антонов, М.В. Технология производства электрических машин: Учебное пособие / М.В. Антонов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.
10. Антонов, М.В. Эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебное пособие / М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец. – М.: Высшая школа, 1989. – 192 с.
11. Маршак, Е.Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей / Е.Л. Маршак. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 264 с.

12. Атабеков, В.Б. Ремонт трансформаторов, электрических машин и аппаратов: Учебник / В.Б. Атабеков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1994. – 383 с.
13. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов; под ред. Н.Ф. Котеленца. – М.: Академия, 2003. – 384 с.
14. Акимова, Н.А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования: Учебное пособие для среднего профессионального образования / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрихин; под ред. Н.Ф. Котеленца. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2008. – 300 с.
15. Новоселов Е. М. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю : дис. – диссертация... кандидата технических наук: 05.14. 02/Новоселов Евгений Михайлович, 2018.
16. Уманцев, Р.Б. Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток крупных электродвигателей. – М.: Энергия, 1976. – 80 с.
17. Скоробогатов, А.А. Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 2006. – 155 с.
18. Рассказчиков, А.В. Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – ЛПИ, 1982. – 195 с.
19. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Причины повреждения электродвигателей в пусковых режимах на блочных тепловых электростанциях // Электрические станции. – 1974. – № 1. – С. 33-35.
20. Данилова С.П., Соколов Р.И., Шулежко Е.А. Надежность высоковольтных электродвигателей блочных тепловых электростанций // Электрические станции. – 1976. – № 4. – С. 49-50.

21. Иноземцев Е.К. Ремонт высоковольтных электродвигателей (часть 1). – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с. – [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 5 (29)].
22. Клоков, Б.К. Ремонт обмоток электрических машин высокого напряжения: Учебное пособие / Б.К. Клоков, Р.Б. Уманцев. - М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
23. Сахновский, Н.Л. Испытание и проверка электрического оборудования / Н.Л. Сахновский. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.
24. Горбунов В.И. Метод контроля паяк стержней короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей // Электрические станции. – 1970. – № 1. – С. 71-72.
25. А.с. 266323 СССР, МПК6 G 01 N 27/83, H 02 K 15/00. Дефектоскоп для контроля беличьей клетки роторов электродвигателей / А.И. Зайцев, В.П. Обрусник, М.П. Табинский (СССР). Оpubл. 17.03.1970, Бюл. № 11. – 2 с.
26. Никиян Н.Г., Саликов М.П. Способ и установка для диагностики короткозамкнутых клеток электрических машин // Электрические станции. – 1999. – № 3. – С. 60-62.
27. Сахиповский Н.Л., Юрчакевич Е.Р. Проверка исправности стержней роторов асинхронных короткозамкнутых электродвигателей // Электрические станции. – 1961. – № 12. – С. 62-63.
28. Пат. 92356 PL, МКИ2 G 01 R 27/00, H 02 K 11/00 Sposób i układ do selekcji aluminiowych odlewów klatek wirników silników asynchronicznych / Staniszewski Janusz (PL), Silikowski Jan (PL); Politechnika Gdańska (PL). Оpubл. 31.12.77. – 3 с.
29. Пат. 97523 PL, МКИ2 G 01 R 31/00, H 02 K 11/00 Urządzenie do badania klatki wirnika maszyny asynchronicznej, w stanie statycznym / Skwarna Jan (PL), Urbanski Janusz (PL), Lszocki Wieslaw (PL); Politechnika Lubelska (PL). Оpubл. 30.06.78. – 4 с.
30. Monior R.R. Test for open rotor bars is simple. // Pover. № IX. – Vol.107.– № 19.

31. А.с. 843111 СССР, МПК5 Н02 К 15/00. Способ контроля электрической и магнитной несимметрии ротора асинхронного двигателя / К.О. Согибян (СССР). Опубл. 30.06.1981, Бюл. № 24. – 3 с.
32. Бабенко, Д.А. В помощь электрику-обмотчику асинхронных электродвигателей / Д.А. Бабенко, С.И. Тепленко, Л.Д. Чибишев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1965. – 256 с.
33. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 13-15.
34. Волохов С.А., Добродеев П.Н. Влияние диагностического эксцентриситета на внешнее магнитное поле электрических машин // Техническая электродинамика. – 1997. – № 3. – С. 18-21.
35. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Влияние магнитной несимметрии статора на внешнее магнитное поле электрических машин // Техническая электродинамика. – 1997. – № 4. – С. 8-12.
36. Рассказчиков, А.В. Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – ЛПИ, 1982. – 195 с.
37. Ковязин Л.В. Принцип контроля исправности стержней ротора асинхронного электродвигателя и устройство для его реализации // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (6-е издание Бенардосовские чтения). – Иваново: ИЭИ, 1992. – С. 25.
38. А.с. 1610443 СССР, МПК6 G 01 R 31/06, H 02 K 15/00. Устройство для контроля целостности стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя / Л.В. Ковязин, В.А. Савельев (СССР). Опубл. 30.11.1990. Бюл. № 44. – 3 с.
39. А.с. 917136 СССР, МПК6 G 01 R 31/34, H 02 K 15/00. Устройство для обнаружения повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного

двигателя / А.В. Рассказчиков, В.А. Савельев, А.А. Чижов, В.Т. Жилиев (СССР).  
Опублик. 30.03.1982, Бюл. № 12. – 3 с.

40. Гурьевич Э.И., Мамиконянц Л.Г. Некоторые задачи диагностики теплового состояния электрических машин // Электричество. – 1979. – № 10. – С. 20-26.

41. Сеницын, Б.С. Автоматические корреляторы и их применение / Б.С. Сеницын. – Новосибирск: Редакционно-издательский отдел СО АН СССР, 1964. – 268 с.

42. Gaydon B.G., Hopgood D.J. Faltering pulse can reveal an ailing motor / Electrical Review. – 1979. – vol. 205. – no. 14. – pp. 37-38.

43. А.с. 1262425 СССР, МПК6 G 01 R 31/02, G 01 R 31/34. Устройство для обнаружения повреждения стержней короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя / А.В. Рассказчиков, В.А. Савельев, А.Б. Колобов, Л.И. Сауцкий (СССР). Опублик. 07.10.1986, Бюл. № 37. – 3 с.

44. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 10. – С. 50-52.

45. А.с. 1304176 СССР, МПК7 Н 03 М 13/13. Способ контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя и устройство для его осуществления / В.Ф. Сивокобыленко, В.С. Гармаш (СССР). Опублик. 15.04.1987, Бюл. № 17. – 3 с.

46. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора асинхронных электродвигателей без их отключения // Электротехника. – 1998. – № 10. – С. 46-51.

47. А.с. 1121633 СССР, МПК6 G 01 R 31/34. Способ контроля обрыва стержней ротора асинхронных электродвигателей. / М.А. Гашимов, Н.А. Аскеров (СССР). Опублик. 30.10.1984, Бюл. № 40. – 5 с.

48. Ковязин, Л.В. Разработка принципов и устройств высокочастотного контроля электротехнического оборудования электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 1993. – 280 с.

49. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. – № 2. – С. 44-45.

50. А.с. 800906 СССР, МПК5 G 01 R 31/06. Способ определения повреждения стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Г.А. Брюханов, С.А. Князев (СССР). Опубл. 30.01.1981, Бюл. № 4. – 3 с.

51. Monior R.R. Test for open rotor bars is simple. // Pover. № IX. – Vol.107.– № 19.

52. Гурьевич Э.И., Мамиконянц Л.Г. Некоторые задачи диагностики теплового состояния электрических машин // Электричество. – 1979. – № 10. – С. 20-26.

53. Сеницын, Б.С. Автоматические корреляторы и их применение / Б.С. Сеницын. – Новосибирск: Редакционно-издательский отдел СО АН СССР, 1964. – 268 с.

55. Gaydon B.G., Hopgood D.J. Faltering pulse can reveal an ailing motor / Electrical Review. – 1979. – vol. 205. – no. 14. – pp. 37-38.

56. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 10. – С. 50-52.

57. Новожилов А.Н., Андреева О.А., Кислов А.П. Энергопотребление асинхронного двигателя при обрыве стержней и эксцентриситете короткозамкнутого ротора // Вестник ПГУ. – 2004. – № 1. – С. 204-217.

58. Удут Л. С., Мальцева О. П, Кояин Н. В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

59. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электропроводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

60. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 272 с.

61. Моделирование процессов в асинхронном двигателе с поврежденным стержнем короткозамкнутого ротора в режиме выбега / А.Н. Новожилов, А.О. Потапенко, Т.А. // Новожилов Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 2–6.

62. Качин С. И., Чернышев А. Ю., Качин О. С. Электрический привод: учебно-методическое пособие //Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. – 2009.

63. Шрейнер Р. Т., Поляков В. Н., Медведев А. В. Математическое моделирование явнополюсных синхронных двигателей с автоматическим подбором параметров локальных характеристик намагничивания //Электричество. – 2016. – №. 2. – С. 57-64.

64. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

65. ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDTs). Часть 1. Общее введение.

66. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

67. ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 4. Требования к клавиатуре.

68. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* .

69. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.

70. ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
71. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
72. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования.
73. ГОСТ 12.4.002-97 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний.
74. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
75. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1).
76. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
77. ГОСТ 12.1.009-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения.
78. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое).
79. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
80. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 N 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок".
81. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".
82. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
83. Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 N 2398 (ред. от 07.10.2021) "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий".

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Diagnosis of damage to the rotor in an asynchronous motor with a short-circuited winding

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Ефименко Ростислав Сергеевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин Вадим Владимирович	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

## INTRODUCTION

Asynchronous motors are widely used both in the installations of industrial enterprises and for the power plants own needs. More than 80% of the energy generated in the country is consumed by this type of electric machines, and the need for them continues to grow until now.

The probability of damage to engine elements increases with an increase in the number of machines in operation. Usually, the use of machines in an emergency condition leads to significant financial losses. These losses, caused by unpredictable equipment failure, lead to downtime of working mechanisms, disruption of a complex technological process and a significant increase in energy consumption.

Broken or loose bars in rotor windings are among the most common faults in asynchronous motors. This type of fault accounts for more than 80% of all damage to the rotor winding. Such defects are currently detected only during major repairs with a complete decommissioning of the device, but due to the high frequency of such events, it is not always possible to determine a malfunction in the rotor winding in a timely manner, which leads to prolonged operation of an asynchronous motor with broken rods. The operation of such machines entails an increase in power consumption and significant vibrations that affect the motor bearings. The asymmetry of the rotor windings is manifested in the excessive consumption of electrical energy. The amount of such excess energy consumption for a year of operation can be comparable, or even exceed the cost of the engine.

Vibration diagnostics is the main method by which you can assess the condition of the engine elements. For the installation of equipment, it is required to ensure the stop of the electric motor, which can be problematic in production conditions and is associated with financial or technical difficulties. Thus, the development of methods for diagnosing damage to the rotor in an asynchronous motor with a short-circuited winding without taking the motor out of service is an urgent task today.

# 1 PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM

## 1.1 Design features of asynchronous motors up to 400 kW.

Asynchronous motors with short-circuit rotor are driving mechanisms for a large number of industrial installations. This is due to the positive qualities of such engines, such as:

- a) reliability;
- b) manufacturability;
- c) high efficiency;
- d) low operating costs;
- e) maintainability;
- e) the ability to withstand short-term mechanical overload;
- g) low-cost relative to motors with phase rotors.

A significant factor in choosing an asynchronous motor is the absence of expensive permanent magnets.

Asynchronous motors have two main parts: a fixed stator and a rotor rotating inside it, connected by a shaft to the working units of pumps, turbines and conveyors.

The rotor magnetic circuit for motors with power up to 400 kW is made of solid annular plates of electrical steel, pressed on a restraining mandrel. The short-circuit winding is made by pouring aluminum into the grooves of the rotor without additional insulation, while the closing rings are cast as one piece with the rods. Thanks to this design, there is no need for additional pressing elements holding the plates of the magnetic circuit in the axial direction.

This method of manufacturing short-circuit rotors is the most technologically advanced and provides good contact between the rods and the rings. But at the same time, the pouring process is complicated by the ability of molten aluminum to actively oxidize. This property of aluminum leads to the fact that during

the process an oxide film gets into the grooves and rings, which can lead to cracks, incomplete filling or breaks of the rods when the metal cools.

## **1.2 The main types of faults in short-circuit rotors of asynchronous motors up to 400 kW.**

During the operation of asynchronous motors, damage to the rotor rods is quite common. The breakage of the rods usually occurs in the slot part or on the protruding part of the active steel (separation from the closing ring, breakage at the exit from the slot).

The most unfavorable is the breakage of the protruding rod, in which, under the action of centrifugal force, the torn end is bent and cuts through the high voltage winding of the stator, which leads to a complex and expensive repair.

Failure of a short-circuited winding can be caused by cracked rods. In most cases, this leads to breaks, but sometimes, the engine can run with broken rods for a long time, which is highly undesirable. It is not always possible to detect such a defect at the place of operation, and as a result, this leads to an emergency engine failure at the most unfortunate moment of the production process.

The joints of the rods and rings are often subject to desoldering, which are caused by violations in the process of industrial soldering. It should be noted that with properly performed work, this knot is quite strong.

Breaks of short-circuiting rings are less common due to the action of such factors as: dynamic stresses; centrifugal forces; high temperatures; mechanical overvoltages.

## **1.3 Analysis of methods for diagnosing damage to the short-circuited rotor winding of asynchronous motors**

To date, there are methods and devices that help diagnose the condition of the rods in short-circuit motor windings. They can be divided into three groups:

1. The method of repair control, carried out when removing the a short-circuited rotor on a completely stopped machine.
2. Methods and devices for test diagnostics. A test action is applied to an asynchronous motor, which is formed by IM modes or a diagnostic system.
3. Methods and devices for functional diagnostics. Implementation of control without taking the machine out of service during normal operation.

During repair work with engine disassembly, the following diagnostic measures are taken:

1. Visual control. When you can determine the signs of damage visually: breaks; cracks; traces of discoloration on the rods and in the grooves.
2. Acoustic diagnostics. The defect is detected by hitting the outer part of a healthy and defective rod, followed by a comparison of the sound tones.
3. Control with a microohm meter. A sharp change in resistance is observed on a damaged rod.
4. Measurement of the magnitude of the scattering flux. Diagnostics is carried out by the magnitude of the leakage magnetic flux induced by the current of the rod, a sharp decrease in which indicates damage. The most commonly used methods use inductive sensors on horseshoe magnets.

The disadvantages of the methods of repair diagnostics is the inability to control the state of the windings in operating modes. As well as the impossibility of detecting a malfunction at an early stage of its development.

Test diagnostics is based on an artificially created start mode. Today there are the following testing methods:

1. Connecting two phases of an asynchronous machine to an AC voltage source with current control using a stub oscilloscope. Thus, during a break, current peaks will be observed.
2. Measurement of stator current fluctuations with a frequency equal to the slip frequency, in the process of disconnecting one stator phase from the network and closing the other two to additional resistances when the engine is idling.

3. Control in the short circuit mode (with a stationary rotor), by an external electromagnetic field. A measuring magnetic system with multipole magnetizing and bipolar measuring windings is placed on the body of the induction motor, which measures the magnetic dipole of the external electromagnetic field. When a break occurs, the magnitude of the magnetic dipole increases significantly, while in a symmetrical winding it is practically equal to zero.

The advantage of these methods includes the ability to detect the breakage of one rod; no need to install sensors inside the engine; the possibility of diagnosing the starting winding.

The disadvantages are: unsuitability of methods for two-pole asynchronous motors; complex control and measuring system.

4. Control of the high-frequency component of the electromagnetic field around the rotor winding, induced by high-frequency currents (from 10 kHz) in the arc, between the contacts of the damaged rod. On the sensor inside the stator, when the rods break, a high-frequency EMF is induced. The amplitude of the EMF is modulated by low-frequency signals with a doubling of the rotor current clock.

The advantages of the method are: the ability to measure both in normal operating modes and during transients; good sensitivity at start-up; suitability for starting winding; single bar break detection.

The disadvantages of the method include: measurements are carried out mainly when the engine is started; installation of the sensor inside the engine; low confidence.

5. Measurement of stator phase current pulsations in the starting mode. The amplitudes of these components depend only on the parameters of the asynchronous motor and exceed the rated current by 5-7 times.

Advantages: good reliability of data in the starting mode.

The disadvantages are: diagnosing only at start-up; the unsuitability of the method for engines with a start time of less than 2.5 s; the absence of criteria for the transition from a working state to a non-working one.

Functional diagnostics is based on the study of signals measured during normal engine operation. The method uses direct or indirect measurements with subsequent

analysis of the parameters of a running electric motor and the physical fields surrounding it.

The existing methods for such diagnostics of rotors can be divided into methods:

- a) using sensors outside the asynchronous motor;
- b) with the installation of the sensor inside the asynchronous motor;
- c) using current transformers as sources of information.

In foreign literature, a method is described in which the measurement of the magnitude of the magnetic flux induced from the rods along the perimeter of the rotor is carried out using a device that fixes the output signals from the electromagnetic sensor in the stator and from the external engine speed sensor.

The advantages are: the ability to detect one rod; the measurement is performed in a stationary operating mode; has criteria for the transition from a healthy state to a damaged one.

The disadvantages include: installing the sensor inside the engine; weak protection of the useful signal from interference and its distortion by the filters used in the device; low confidence.

Another way describes the asymmetry of the magnetic field when the rods are broken, when the vibration of the housing and the rotor is manifested. Diagnostics is supposed to be carried out on a certain frequency spectrum, since vibration may depend on the drive mechanism and bearing wear. On the computer, only the useful part associated with damage to the rotor is isolated.

Advantages: measurement in stationary mode without installing sensors inside the engine.

Disadvantages: does not have clear criteria for the transition from good to non-working state, low reliability.

The use of current transformers is possible as sensors that are installed in the phases of the motor stator winding. A diagnostic sign will be a sharp increase in the amplitude of the ripples of certain currents of the damaged rod, which occur due to negative sequence currents in the rotor winding.

Diagnostic methods based on monitoring the amplitude of the phase current pulsations of the stator winding with the rotor slip frequency do not require the installation of additional sensors in the IM. As a diagnostic apparatus, a current transformer is used, connected to the phases of the stator windings, which makes it possible to carry out measurements in a stationary mode.

The disadvantages include: low reliability of data as a result of the occurrence of ripples at a variable load.

Currently, the most well-known means of diagnosing a break in a short-circuited rotor have not found wide application. This is due to the fact that the developed devices and systems do not have clear diagnostic criteria, and also have low sensitivity when one rod breaks.

#### **1.4 Technical and economic effect of early detection of defects in the rotor chain**

Today, there is an increase in the need for repair work and scheduled maintenance of asynchronous motors with short-circuited rotors. This is directly related to the overall increase in the number of machines in operation and service life, and as a result, the obsolescence of engines in production.

Malfunctions in the rotor bars are difficult to determine both during manufacture and during operation. At the same time, they account for over 10% of all damage to asynchronous machines. In the operation of a motor with a short-circuited winding defect, there is an increase in currents in the stator and an increase in vibrations, which in turn leads to premature wear of bearings, stator windings, etc.

Timely and reliable diagnostics are necessary to maintain a high level of reliability of an induction motor. Therefore, high demands are placed on technical control systems and methods for detecting defects.

The main damage during the operation of asynchronous motors with asymmetry of the rotor windings is the excessive consumption of electricity, the amount of which, for a year, may exceed the cost of a new motor. Based on this, it

follows that the development of diagnostic systems is an urgent task today and has a significant technical and economic effect, due to the amount of damage prevented.

### **1.5 Comparative analysis of mathematical models for research.**

The mathematical model of an asynchronous motor in a fixed coordinate system establishes the main relationships between the subsystems of the electric motor, which are the basis for other models.

One of the disadvantages of the model of an induction motor with a short-circuited rotor in a fixed coordinate system is that it does not allow taking into account the electrical asymmetry of the rotor circuits. Therefore, this model cannot be used to simulate an engine with damage to the rotor bars.

Often the process of energy conversion in an asynchronous motor with a short-circuited rotor winding in transient and stationary modes is described by a mathematical model in phase coordinates. However, for studies related to the electrical asymmetry of rotor circuits, the most suitable model is in the m-phase coordinate system

The representation of the mathematical model of the motor in the m-phase coordinate system allows the most reliable description of the physical processes in the stator windings when the rotor is damaged.

The advantage of this model is the possibility of introducing damage to the rotor rods into the model. The main disadvantage of the model is its complexity.

## **2 DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR DETERMINATION OF BREAK OF RODS IN A ROTOR**

### **2.1 Development and testing of a simulation model of an asynchronous motor with a short-circuited rotor in m - phase coordinate system in the Matlab software environment Simulink**

The mathematical model was developed in the MATLAB software environment and its extension Simulink, which allows for block visually-oriented simulation of various systems and devices.

For the study, an asynchronous electric motor of the ADM100S4U3 type was chosen. The number of rods for the engine under study was taken to be  $n = 28$ .

Three-phase sinusoidal voltages are applied to the input, which are shifted by 120 degrees. Then the instantaneous voltages are converted from the three-phase coordinate system. The dimension of the coordinate system is determined by the number of stator and rotor phases.

The task of damages in the rotor bars is implemented by increasing the resistance in the «MATLAB block Fcn», which allows you to form the location and number of damaged rods.

The calculation of the stator currents and motor torque is carried out. After that, the angular velocity of the rotor shaft is determined, where the input action is the engine torque. The speed data is used to determine the angle needed to calculate the mutual inductances.

Based on transient processes in a two-phase and multi-phase coordinate system, as well as instantaneous values of the relative error of the torque, speed and envelope of the stator current, it can be concluded that the developed n-phase mathematical model of an asynchronous machine allows us to investigate the operation of the motor with acceptable accuracy.

The study of broken rods in the rotor is carried out using an n-phase asynchronous machine, by introducing additional resistance into the equations for the

corresponding phase. Since the model in a two-phase coordinate system does not take into account the electrical asymmetry of the rotor circuits, it cannot be used to model a motor with such damage.

When 3 rods are broken, low-frequency oscillations appear in transients, which are amplified under load on the motor shaft

With the appearance of emergency rods, harmonic oscillations are observed in the current envelope, which depend on the current load and on the percentage of defective rods and normal ones. Harmonic oscillations in the breaking of the rods have a certain frequency and amplitude. By analyzing these components, as well as their shape, we can draw conclusions about the current state of the engine. The envelope of the stator currents contains a diagnostic feature that allows you to determine with a certain accuracy the breakage of the rod in the rotor.

## **2.2 Development of a diagnostic system to detect damage in the rotor circuit**

An important task is filtering the high-frequency component of the stator current envelope vector. When using most types of filters in diagnostic systems, there are risks of filtering out the useful signal, which is necessary for diagnosing the engine condition.

The finite impulse response filter (FIR) was chosen for the study, as it has the following advantages:

1. Resistant;
2. Has a simple calculation and setting;
3. Relatively simple design.

The stator phase currents are fed to the input of the designed system, which have noise caused by the operation of the frequency converter, then the envelope of the current vector is calculated, in which noise is also present. To obtain a useful signal, a FIR filter is used, which highlights the low-frequency component. Based on the received signal, a constant value is determined and a variable component is selected,

which is converted into a unipolar signal, and subsequently the average current component is calculated.

### 2.3 Study of the diagnostic system

In this paper, the noise from the operation of switching the keys of the frequency converter is simulated artificially in order to save the calculated power and unload the simulation model.

After filtering, low-frequency oscillations are observed, and with an increase in engine load, the useful signal becomes more informative. The obtained parameters of the FIR filter showed that the diagnostic feature was preserved.

To numerically express the magnitude of fluctuations (diagnostic signal) using the *Mean2* block in the *Subsystem5* subsystem (Figure 1), the constant component of the signal is excluded. *Abs* block converts the variable component of the signal into a unipolar one, and using the *Mean1* block, the average component is selected, which will show the magnitude of the fluctuations in relative units and display these readings on the *Display2* block.

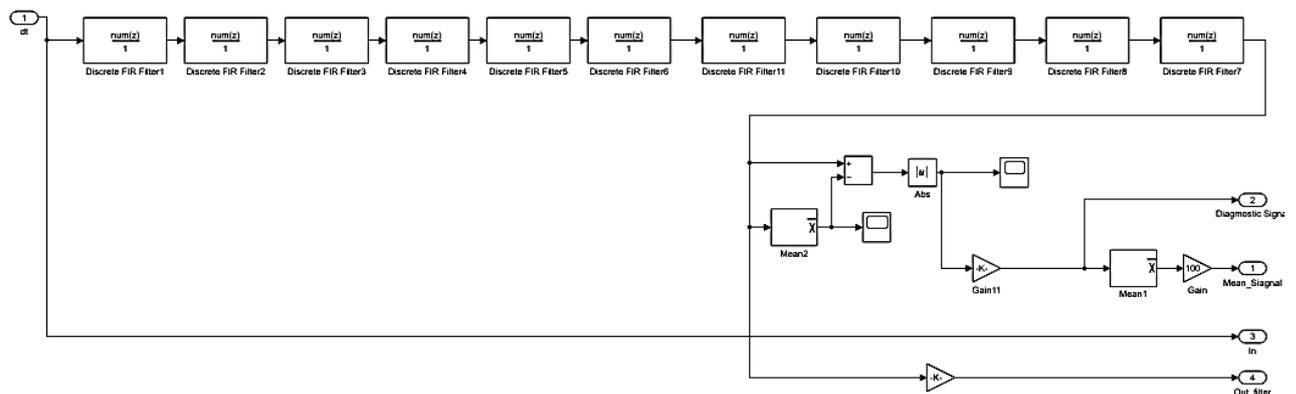


Figure 1 - Simulation model of the diagnostic system

The oscillation values obtained by this method will be a diagnostic criterion for the transition of the engine from a working state to a faulty one. To do this, it is necessary to set the reference value of the magnitude of oscillations when the engine is running at 70% load and without damaging the rods. The reference values are set for a specific drive with the normal state of the windings, i.e. after installation and adjustment, the values that are taken as reference ones are fixed.

To protect against false positives of the diagnostic system, the following algorithm is provided (Figure 2):

1. A certain threshold value is fixed, at which an alarm will be triggered.
2. If the alarm signal persists for a certain time period, then this indicates a change in the state of the asynchronous motor.

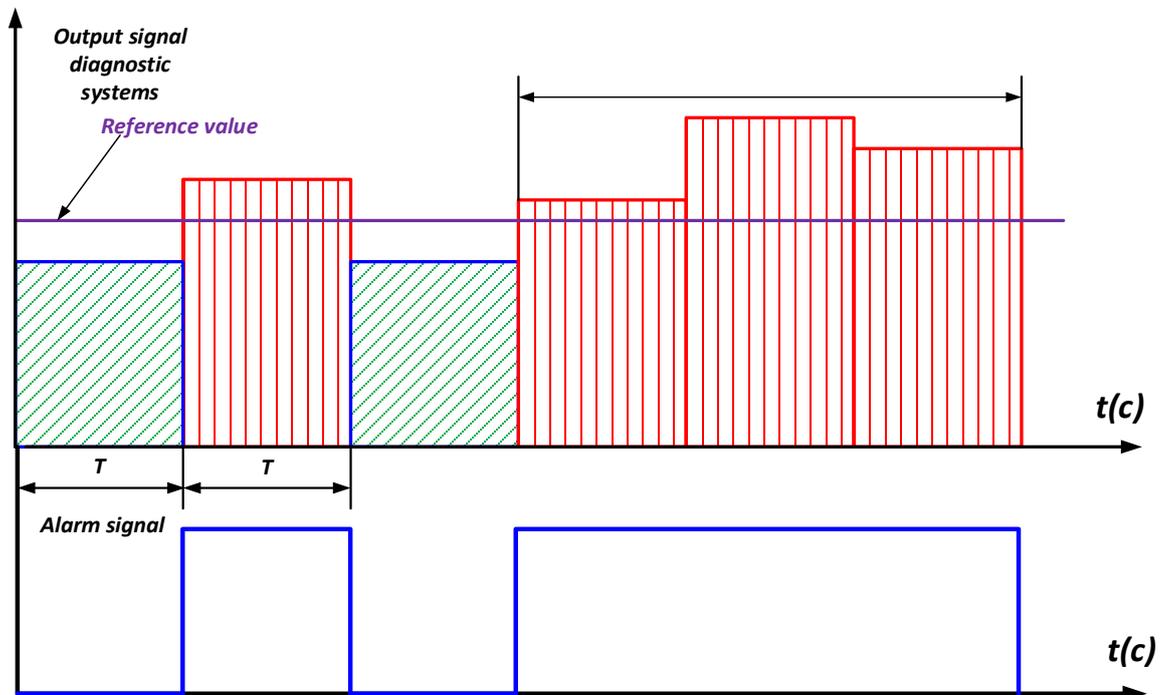


Figure 2 - Algorithm for protection against false positives

## 2.4 Findings

1. The experimental setup made it possible to investigate the performance of the developed diagnostic system in the main operating modes of the IM.
2. The conducted experiments showed that the envelope of the stator currents contains a diagnostic feature that allows to determine with a certain accuracy the breakage of the rod in the rotor.
3. The proposed model of the diagnostic system based on the FIR filter is able to recognize the emergency condition of the engine and is protected from false positives.

## CONCLUSION

In the master's degree project we solved an important scientific and technical problem related to improving the operational reliability of electric drives based on asynchronous motors with a short-circuited rotor. The theoretical and experimental studies allowed us to get the results and conclusions:

1. One of the most vulnerable nodes of asynchronous motors is a short-circuited rotor. Breakage of the rotor bars can cause vibration, unbalance of the rotor and stator currents, increased power consumption from the network and possible further damage, which entails a danger to the operating personnel. Damage to the rotor rods causes significant economic damage, which manifests itself in increased energy consumption, it follows that the development of a diagnostic system has a significant economic effect, determined by the amount of damage prevented.

2. Representation of the mathematical model of AM in the  $m$ -phase coordinate system makes it possible to describe the physical processes in the stator windings with damage of the rotor as reliably as possible. This model was developed and successfully tested in the Matlab Simulink software environment.

3. It has been experimentally revealed that the stator current envelope modulus curve changes its shape depending on the number of rotor rods excluded from the calculations of the mathematical model and allows you to identify a diagnostic feature that characterizes the state of the electric motor.

6. A diagnostic system based on an FIR filter has been developed and modeled. It makes possible to recognize the emergency condition of the engine. Besides a tuning algorithm from false positives is proposed.