### Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Энергетический институт Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика электротехника Кафедра ЭПЭО

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы

Анализ магнитных и тепловых процессов в аварийных режимах работы асинхронного двигателя

УДК <u>621.313.333.004.07</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2А	Казанцев Артём Владимирович		

Руководитель

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Уче ная сте пе нь,	Подпись	Дата
		звание		
Доцент	Трофимова М.Н.			
По разделу «Социальная	ответственность»			
Должность	ФИО	Уче ная степень,	Подпись	Дата
		звание		
Доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

#### **ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

	, ,			
Зав. кафедрой	ФИО	Уче ная сте пе нь,	Подпись	Дата
		звание		
	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., к.т.н.		

Томск – 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ

## ФЕДЕРАЦИИ

## Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электропривода и электрооборудования

## УТВЕРЖДАЮ:

Зав.кафедрой	*****	Ю.Н.Дементьев
«	>>	2016г.

## ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Студенту гр. 5Г2А Казанцеву Артёму Владимировичу.

1. Тема выпускной квалификационной работы

## «Анализ магнитных и тепловых процессов в аварийных режимах работы асинхронного двигателя»

утверждена приказом ректора (распоряжением директора ЭНИН)

ot \_\_\_\_ №

- 2. Срок сдачи студентом готовой работы
- 3. Исходные данные к работе

Напряжение питающей сети: 3ф/220 В.

Напор вентилятора (давление): p = 23Па.

Производительность вентилятора: 45м м3/

Максимальный момент электропривода в пуско-тормозных режимах: <u>М<sub>эпмакс</sub>=2,3 Н·м.</u>

<u>Максимальный момент нагрузки: М<sub>СМАКС</sub>=0,12 Н·м.</u>

<u>Минимальный момент нагрузки: М<sub>СМАКС</sub>=0,012 Н·м.</u>

Диапазон регулирования: 1:25.

<u>Требования к анализу магнитных и тепловых процессов в аварийных</u> <u>режимах:</u>

- расчет нерегулируемого ЭП с асинхронным двигателем;
- исследование аварийных режимов и причин отказов асинхронного двигателя;
- изучение схемных решений по обеспечению живучести двигателя в аварийном режиме;

- разработать математическую модель асинхронного двигателя, для моделирования распределения магнитного поля и исследования температурного режима двигателя;
- выявление изменений магнитного поля в зависимости от режима работы двигателя и визуализиция результатов исследований;
- моделирование процессов выделения тепла и установления теплового равновесия в двигателе;
- представление результатов переходного процесса температуры и картины распределения теплового поля в поперечном сечении двигателя.

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1 Введение.

4.2 Изучение рабочих и аварийных режимов работы.

4.3 Расчет ЭП на основе асинхронного двигателя.

<u>4.4 Исследование тепловых и магнитных процессов в рабочих и аварийных режимах работы асинхронного двигателя.</u>

4.5 Моделирование магнитных процессов асинхронного двигателя.

4.6 Моделирование процесса распределения тепла в асинхронном двигателе.

4.7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

4,8 Социальная ответственность.

4.9 Заключение.

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

5.1 Функциональная схема частотно-регулируемого трехфазного асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести.

5.2 Принципиальная схема силового ключа преобразователя частоты.

<u>5.3 Расчетная схема асинхронного двигателя в моделировании магнитных и тепловых процессов.</u>

5.4 Алгоритм процесса моделирования в программном пакете COMSOL.

6. Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Руководитель

(подпись, дата)

Задание принял к исполнению

(подпись, дата)

## Оглавление

Введение
1 Изучение рабочих и аварийных режимов работы7
1.1 Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным
электроприводом в аварийном режиме работы7
1.2 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства
живучести
1.3.1 Выбор электродвигателя, расчет статических и динамических характеристик
для вентиляторной нагрузки14
1.3.7 Обоснование и расчет параметров драйвера управления силовым ключом
преобразователя частоты
2 Исследование тепловых и магнитных процессов в рабочих и аварийных режимах
работы асинхронного двигателя
2.1 Постановка задачи
2.2 Математическое моделирование магнитных процессов асинхронного двигателя
2.3 Моделирование процесса распределения тепла в асинхронном двигателе39
2.3.2 Моделирование распределения тепла двигателя в программной среде
COMSOL Multiphysics
Список литературы:

### ΡΕΦΕΡΑΤ

Выпускная квалификационная работа содержит 80 страниц, 18 рисунков, 36 таблиц, 33 источников, 5 приложения.

Ключевые слова: отказоустойчивый асинхронный электропривод, математическая модель асинхронного двигателя, неполнофазный режим работы, обрыв фазы двигателя, индукция магнитного поля, картина распределения тепла, алгоритм восстановления работоспособности.

Цель работы – исследование тепловых и магнитных процессов в рабочих и аварийных режимах работы асинхронного двигателя. Проверка эффективности системы управления с алгоритмом восстановления работоспособности. Построить модель асинхронного двигателя с целью моделирования распределения магнитного и теплового поля в сечении двигателя. Визуализация результатов моделирования с целью сопоставления формы поля с режимом работы АД. Создать модель для теплового расчета асинхронного двигателя.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2007 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2013, COMSOL Multiphysics.

#### Введение

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

Современный электропривод является не только электросиловой основой, позволяющей обеспечить необходимой механической энергией производственной энергией, но и средством управления технологическими процессами.

Асинхронных электропривод активно используется практически во всех промышленных установках. Область применения электропривода механизмы вентиляторов, насосов, подъемно-транспортных средств, приводы главного движения и вспомогательных механизмов. Вопросы отказоустойчивости электроприводов приобретают большое значение при их применении в составе опасных производственных объектов в таких отраслях, как: ядерная, военная, химическая, строительная, металлургия, транспорт. Очевидно, что повышение отказоустойчивости неразрывно связано с живучестью электроприводов, обеспечивающих функциональные свойства технологического оборудования в заданных пределах. Обеспечить свойство живучести возможно на основе технологии построения избыточных систем, в n-секционных ЭП используя комбинацию следующих видов резервирования: информационного структурного, функционального, временного, И нагрузочного.

## 1 Изучение рабочих и аварийных режимов работы

## 1.1 Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом в аварийном режиме работы

## 1.1.1 Обзор известных технических решений отказоустойчивого электропривода переменного тока.

Электропривод переменного тока построенный на основе асинхронных двигателей является основой построения практически всех сложных технических систем вращательного и поступательного принципа действия. Вопросы отказоустойчивости ЭП приобретают большое значение при использовании в составе опасных производственных объектов в таких отраслях, как: ядерная, военная, химическая, строительная, металлургия, транспорт и др. В этом случае от надежности работы асинхронных двигателей, входящих в составе электрооборудования, напрямую зависят здоровье и жизни людей. Объекты транспортного комплекса обладают чрезвычайно большой опасностью, особенно при перевозках потенциально опасных грузов (взрывчатых и отравляющих веществ, оборонных грузов, авиационных и ракетных систем, ядерных материалов). Существует безопасности отказоустойчивости необходимость обеспечения И электропривода в составе насосных агрегатов при транспортировке газа, нефти и продуктов их переработки. Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001. Перечень опасных производственных объектов представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 Опасные производственные объекты

Можно выделить три группы неисправностей ЭП: неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети; неисправности механической части электропривода (включая редуктор); неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды.

Неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети:

- короткое замыкание в обмотках двигателя;
- перегрузка по току;
- обрывы в обмотках двигателя;
- пробой изоляции фазы обмоток на корпус;
- обрыв питания одной из фаз;
- возникновение 1 или 2 фазного режима 3 фазного электродвигателя;
- возрастание потребляемой мощности при неизменной нагрузке на валу электродвигателя;
- несимметрия фаз питающей сети;
- падение скорости вращения вала электродвигателя ниже номинальной (превышен вращающий момент);
- «опрокидывание» АД или внезапное уменьшение нагрузки;
- неправильное чередование фаз;
- снижение межвитковой и межфазной изоляции (полное или частичное междуфазное замыкание);
- изменения частоты и напряжения питающей сети за допустимые значения;
- не отработки команды на пуск двигателя вследствие неисправности (пропадания) фазы сети;
- чрезмерно большая частота включений;
- затянувшийся пуск;
- отказ в функционировании микроконтроллера (непрохождение операции самотестирования).

Неисправности механической части электропривода:

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

Неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды:

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

В данной работе рассмотрены аварийные ситуации типа обрыв фазы статора. Процессы, происходящие в асинхронном двигателе при обрыве фазы питающей сети, рассматриваются в [1, 2, 3, 4, 5]. Последствия, вызванные потерей фазы двигателя со схемой подключения со связанными фазами, могут привести к выходу двигателя из строя и нарушению технологического процесса для типовой схемы подключения. Аварийный двухфазный режим работы представляет большую опасность для двигателя. Токи, протекающие по обмоткам статора, превышают номинальные и зависят от большого числа различных факторов таких, как величина момента нагрузки, скольжения, схемы соединения обмотки и т.д. Если момент нагрузки превышает критический момент двигателя в двухфазном режиме работы, то произойдет остановка двигателя, в случае же продолжения работы может возникнуть тепловое повреждение двигателя и выход электропривода из строя. Исходя из этого, можно заключить, что работа

электродвигателя, подключённого по схеме со связанными фазами, в двухфазном режиме не допустима.

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

Проблема повышения отказоустойчивости и обеспечения живучести электропривода переменного тока

	<b>V</b>		
Подключение напрямую к сети	Обеспечение	Функциональное	Структурное
	нагрузочного резерва	резервирование	резервирование
(в ручном или	(недоиспользование	(ограничение по мощности в	(увеличение
автоматическом	элементов)	аварийном режиме)	габаритов)
режиме)	,		1 /

Рисунок. 1.2 Способы обеспечения отказоустойчивости электропривода Подключение двигателя напрямую к сети переводит систему в режим нерегулируемого электропривода, что негативно сказывается на эксплуатационных качествах.

При использовании нагрузочного резерва происходит не полное использование оборудования электропривода, что уменьшает энергетические показатели.

Рассмотрим подробней функциональное и структурное резервирование. Вопросы обеспечения отказоустойчивости и живучести асинхронного электропривода описаны в работах российских [6, 7, 8, 9, 10] и зарубежных ученых [11]. Повышение отказоустойчивости неразрывно связано с обеспечением живучести электроприводов в аварийных режимах работы.

Под функциональным резервированием АД понимается построение ЭП, в котором резервирование выполняется с помощью формирования кругового вращающегося поля при работе в двухфазном режиме трехфазного асинхронного двигателя, что обеспечивает необходимый уровень живучести. Данный способ позволяет создать электропривод с повышенной живучестью, не прибегая к дополнительным аппаратным затратам, однако он ограничен в применении, т.к. обрыв одной из трёх фаз двигателя ведет к уменьшению мощности, но можно компенсировать ее за счет нагрузки АД.

Известны следующие работы [6, 10] по применению функционального резервирования асинхронного электропривода, а также технические решения, полученные в патентах [12, 13].

## 1.2 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства живучести.

Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного асинхронного двигателя как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации (в одной из 3 фаз) АД может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

Силовые преобразователи для асинхронных двигателей выполняется по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам (рис1.3 a, б). С целью уменьшения времени переключения структуры электропривода T<sub>п</sub> необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя).



Рисунок. 1.3 Изображена преобразовательная ячейка а - полумоста, б - моста.

Асинхронный электропривод строится на основе управляющего микроконтроллера. Реализуется алгоритм восстановления работоспособности при возникновении аварийной ситуации (при отказе одной или нескольких фаз) с программным формированием заданий на фазные токи. Работа микроконтроллера осуществляется с постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя.

Асинхронный электропривод выполняется по принципу полчиненного регулирования параметров. В минимальном составе (моментный двигатель с параметром регулирования I<sub>0</sub>) должен содержать обратные связи по току. Контур тока для отработки заданного значения может быть аналоговым или цифровым. Структура регулятора тока должна обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемого тока. Контур обратной связи по частоте вращения непосредственно в реализации алгоритма восстановления не участвует.

Асинхронный электропривод должен иметь в составе силового преобразователя датчики состояния преобразовательных ячеек, которые вырабатывают три бита отказа (ячейки силового преобразователя или фазной обмотки двигателя) a, b, c, поступающие в систему управления для отключения отказавшей фазы и реализации алгоритма восстановления. Программный опрос датчиков состояния должен осуществляться в каждом микроконтроллерном цикле управления.

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



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

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

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

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

Электропривод строится на основе управляющего микроконтроллера с использованием информационного резервирования – избыточности процессорного ресурса. Работа микроконтроллера осуществляется с

постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ. В результате программного анализа фазных токов вырабатывается один из трех битов отказа: прямые *a*, *b*, *c* и инверсные  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$  биты отказов.

Изучение отказоустойчивого асинхронного электропривода со структурным резервированием отражено в следующих работах [14, 15].

### 1.2.1 Выводы по разделу

Произведен обзор и анализ способов обеспечения отказоустойчивости электропривода переменного тока.

Определено, что для построения отказоустойчивого асинхронного электропривода требуется обеспечить непрерывную мониторинг элементов преобразователя частоты и обмотки статора двигателя, организовать систему управления, содержащую алгоритм восстановления и позволяющую использовать функциональный или структурный резерв. К таким системам управления можно отнести разработанные системы векторного [16] и частотно-токового [17, 18, 19] управления.

### 1.3 Расчет ЭП на основе асинхронного двигателя

## 1.3.1 Выбор электродвигателя, расчет статических и динамических характеристик для вентиляторной нагрузки.

Постановка задачи:

Для обеспечения вентиляторной нагрузки следует подобрать двигатель, и рассчитать его статические и динамические характеристики, для работы в трехфазном режиме и в аварийных ситуация (при неполнофазном режиме 1из секций n-секционного асинхронного электропривода)

Целью данного раздела является расчет основного электрооборудования и построение статических и динамических характеристик системы, построения системы мониторинга отказов двигателя

и преобразователя частоты, а также выбор алгоритмов восстановления работоспособности в аварийных режимах.

## 1.3.2 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи

Таблица 1

	r
Производительность, м <sup>3</sup> /с	45
Напор (давление), Па	23
КПД	0,65
Механическая характеристика вентилятора,	$\frac{M}{2} = 0.05 \pm 0.95 \cdot (\frac{n}{2})^2$
относительные единицы	$\frac{1}{M_{H}} = 0,03 \pm 0,93 \cdot (\frac{1}{n_{H}})$
Диапазон регулирования	1:3

## Исходные данные вентилятора

Для вентиляторов необходимая мощность определяется по формуле:

$$P = K_3 \cdot \frac{Q_B \cdot H_B}{\eta_B \cdot \eta_\Pi} = 1, 2 \frac{45 \cdot 9, 6}{1 \cdot 0, 6} = 726, 646, \text{ kBr}$$
(2.1)

где,  $K_3$  – коэффициент запаса равный 1,1÷1.3. Принимаем  $K_3 = 1,2$ ;

 $\eta_{\pi}$  – КПД передачи  $\eta_{\pi}$ =0,95;

*Q*<sub>в</sub> – полная номинальная производительность;

*H*<sub>в</sub> – напор (давление) вентилятора;

η<sub>в</sub> – КПД вентилятора.

Выбираем двигатель типа с номинальной мощностью  $P_{H} = 370Bm$ , двигателя АИР63А2 220/380 представлен на рисунок 2, паспортные данные которого приведены в таблице 2. Габаритные размеры двигателя представлены в таблице 3 и на рисунке 1.

Паспортные данные электродвигателя типа АИР-63А2 Таблица 2

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ , кВт	0,37
Номинальный ток статора, А	1.63

КПД, %	0,72
cosφ, o.e.	0,84
Номинальное напряжение ротора, В	380
Номинальный ток ротора, А	0,9
Масса, кг	5,2
Момент инерции, кгм <sup>2</sup>	0,00046



Рисунок 2 – электродвигатель АИР63А2 на напряжение 220/380В

Параметры схемы замещения электродвигателя, таблица 3.1,3.2,3.2.

Таблица 3

$m_{\rm II} = \frac{M_{\rm IIYCK}}{M_{\rm H}}$	$m_{\rm K} = \frac{M_{\rm MAKC}}{M_{\rm H}}$	Степень защиты	<i>s</i> <sub>K</sub> ,%
2,2	2,2	IP44	45

Параметры схемы замещения электродвигателя занесены в таблицу 4:

Таблица 4

<i>R</i> <sub>1</sub> , Ом	$X_{1\delta}$ , Ом	$L_{1\delta}, \Gamma_{\rm H}$	<i>Х</i> <sub>µ</sub> , Ом	$L_{\mu}, \Gamma h$	<i>R</i> <sub>2</sub> , Ом	$X_{2\delta}$ , Ом	$\dot{L}_{2\delta}, \Gamma$ h	<i>X</i> <sub>КН</sub> ,Ом
23,92	19,28	0,0614	285,96	0,9107	23,12	24,83	0,079	44,11

Выбираем вентилятор типа E354 М, представленный на рисунке 1.5. Данный вентилятор предназначен для вытяжки воздуха в различных зданиях, таких как спортивные залы, химически производственные цехи, и промышленных предприятиях.



Ø-355, A-450, B-380, C-203, ØD-360, E-70, ØF-8, ØG-10



Рисунок 1.5 внешний вид вентилятора Vortice Black Hub E 354 M

Компактные Vortice E 354 М – вентиляторы вытяжного типа класса осевых. С помощью применения этих вентиляторов пользователь может создать комфортные условия в своем жилище и справиться с явной проблемой тяжелого, загрязненного и излишне влажного воздуха. Работая при максимальном показателе температуры в 65 градусов и обрабатывая практически 2 тысячи кубометров воздуха в час, вентиляторы *Vortice E* 354 М с легкостью могут создать благоприятные климатические условия любому помещению. Промышленные агрегаты данной модели производятся в Италии из наиболее качественных материалов и со специальным антикоррозийным и противоударным покрытием. Потребляя небольшое количество энергетических ресурсов, и не создавая высокого уровня шума, вентилятор *Vortice E* 354 М характеризуется хорошей производительностью и отличными показателями воздухообработки при их использовании. На рисунке 1.6. представлена зависимость напора от производительности.



Рисунок 1.6 Зависимость напора от производительности для вентиляторов типа *Vortice Black Hub* E 354 M

Краткие характеристики Vortice Black Hub E 354 M

- Расход воздуха: 1850 м<sup>3</sup>/ч;
- Уровень шума: 66,5 дБА
- Давление: 45 Па;
- Macca: 4 кг

## 1.3.3 Определение области работы регулируемого электропривода

Область работы электропривода (рис. 1.7.) задана в 4-х квадрантах плоскости координат:

Область длительной работы ограничена максимальной скоростью электропривода  $\omega_{\text{эпмакс}}$ =170 рад/с и интервалом изменения момента полезной нагрузки  $M_{\rm C MMH} \div M_{\rm C MAKC}, \, {\rm H} \cdot {\rm M}$ . Область длительном режиме В кратковременной работы ограничена максимальной скоростью *w*<sub>ЭПМАКС</sub> = 170 рад/с и Значением электропривода максимального момента электропривода в пуско-тормозных режимах  $M_{{}_{\rm ЭП MAKC}}$  = 2.3 H · м .



Рисунок 1.7 Заданная область работы электропривода

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

Основные способы управления асинхронным частотно-регулируемым

электроприводом и их показатели приведены в таблице 5.

Способ управления	Диапазон регулирования
	скорости
Скалярное управление, закон управления	
$U_1 / f_1 = const$ :	менее 10
<ul> <li>разомкнутая система, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики;</li> </ul>	
- замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора (IR-компенсация или компенсация нагрузки);	10
- замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора и повышением жесткости статических характеристик (IR-компенсация и компенсация	более 10
скольжения),	до 120
<ul> <li>замкнутая система с обратной связью по скорости;</li> </ul>	
Векторное управление:	
<ul> <li>без датчика скорости (с внутренней моделью)</li> </ul>	100–120
- с датчиком скорости	1000

Принимаем способ управления – векторное управление с датчиком скорости, диапазон регулирования 20. Использование векторного управления позволит повысит энергетические показатели электропривода, а также обеспечить работоспособность в случае возникновения аварийной ситуации и продолжить работу в неполнофазном режиме.

1.3.5 Структурная схема силового канала и расчет параметров ЭП
 В силовой канал электропривода входят:

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

При решении задач работы в трехфазном регулируемых асинхронных применяются электроприводов обычно модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат (x, y). На рисунок. 1.8 приведена структурная схема силового канала непрерывной линеаризованной системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора. Входными величинами структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя U<sub>утт</sub> и U<sub>νπν</sub>, а выходной величиной – угловая скорость двигателя ω. Данная характеризуется следующими промежуточными структурная схема  $U_{1X}, U_{1Y}, I_{1X}, I_{1Y}, \psi_{2X}, \psi_{2Y}$  – составляющие напряжения, координатами: тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат (x, y);  $M_{\text{двэм}}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.



Рисунок. 1.8 Структурная схема силового канала системы преобразователь – АД в неподвижной двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора

В структурной схеме присутствуют внутренние обратные связи, в том числе нелинейные перекрестные. Если они скомпенсированы или не учитываются, то структурная схема системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат приводится к виду, показанному на рисунке 1.9.



Рисунок. 1.9 Структурная схема силового канала системы преобразователь – АД в неподвижной двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, при компенсации внутренних обратных связей

## 1.3.6 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя выполним по следующим выражениям:

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя

$$k_{\rm H} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi}}{U_{\rm YIIMAKC}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,02,$$

где U<sub>уп макс</sub>=10 В, – максимальное значение напряжения управления.

Принимаем несущую частоту инвертора  $f_{\text{шим}} = 3 \text{ к} \Gamma \text{ ц}$ .

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{\rm H} = \frac{0.5}{f_{\rm H}} = \frac{0.5}{3 \cdot 10^3} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ c},$$

где  $f_{\rm H}$  – несущая частота инвертора, Гц.

Расчет параметров двигателя проведем последующим выражениям:

Эквивалентная индуктивность обмоток:

- ctatopa:  $L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 0,0614 + 0,9107 = 0,9721 \ \Gamma H$
- potopa:  $L_1 = L_{2\sigma} + L_{\mu} = 0,0791 + 0,9107 = 0,9898 \ \Gamma \mu$
- Коэффициент рассеяния:  $\sigma = 1 \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 \frac{0.9107^2}{0.9721 \cdot 0.9898} = 0.138$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{\mathfrak{H}} = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 23,9232 + 21,1188 \cdot \frac{0,9107^2}{0,9898^2} = 41,8015 \text{ Om}.$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{\ni} = \frac{\sigma \cdot L_{1}}{R_{\ni}} = \frac{0.138 \cdot 0.9721}{41,8015} = 0,0032 \text{ c};$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0.9898}{21,1188} = 0,0469 \,\mathrm{c}$$

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

Момент инерции механизма:

$$\boldsymbol{J}_{\rm M} = 0, 5 \cdot \boldsymbol{J}_{\rm ДB} = 0, 5 \cdot 0,00046 = 0,00023\,{\rm kg} \cdot {\rm m}^2$$
 .

Эквивалентный момент инерции привода:

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

## 1.3.7 Обоснование и расчет параметров драйвера управления силовым ключом преобразователя частоты

Драйверы управления силовым ключом выбирается в соответствии с выбранным ключом и током

Выбор силового ключа проводим, основываясь на токах, рассчитанных в пункте 1.3.8. Из каталога выбран IGBT транзистор фирмы «International Rectifier». Характеристики транзистора приведены в таблице 6

Таблица 6

		Darrent	Ток	Напр-е	Суммарн	Мощнос
Наимен ование	Встроенн ый диод	Режим перекл ючения	коллектора при 100° С, А	насыщени я кол эмит., В	ые потери, мДж	ть рассеяни я (25° С), Вт
IRG4IB C10UD	с диодом	жесткое	3,9	2,15	0,26	25

Выбор драйвера осуществляется по параметрам транзистора.

На основе характеристик транзистора выбираем драйвер фирмы «Semikron». Основные параметры драйвера приведены в таблице 7.

Таблица 7

			Напряже			
Типономи нал драйвера	Число канал ов	Напряже ние силовой цепи, В	ние управлен ия затвором, В	Выходн ой пиковы й ток, А	Частота переключе ния, кГц	Напряже ние изоляции, В
Skyper32 (R)	2	1700	+15/-7	15	50	4000

Вычисление изменения напряжения управления затвором

ΔU=15-(-7)=22 B

Входная емкость

Энергия, накопленная во входной емкости определяется следующим образом:

$$W = 1/2(C \cdot \Delta U^2) = 0.5 \cdot (1350 \cdot 10^{-12} \cdot 17^2) = 195 \ \mu Bm$$

Мощность, необходимая для управления IGBT, вычисляется следующим образом

$$P = f \cdot C \cdot \Delta U^2 = 50 \cdot 10^3 \cdot 1350 \cdot 10^{-12} \cdot 17 = 1.15 \cdot 10^{-3} Bm$$

На рисунке X представлена принципиальная схема драйвера Skyper32 (R).



Рисунок 1.10 – Принципиальная схема включения драйвера.

Питание драйвера осуществляется от однополярного источника напряжением 15 В, управление драйвером происходит через выводы INPUT TOP и INPUT BOT, также драйвером формируется выходной диагностический сигнал ERROR OUT.

Вывод.

Были выбраны силовые ключи в виде IGBT транзисторов в соответствии с расчетным током. К транзистору был выбран драйвер управления, рассчитана мощность, требуемая для управления транзистором.

# 1.3.8 Расчет характеристик разомкнутой системы ПЧ – АД векторное управление

При векторном управлении магнитный поток поддерживается: в первой зоне постоянным  $\psi_{2X} = \psi_{2XH} = const$ , а во второй зоне ослабляется в соответствии с зависимостью  $\psi_{2X} = \psi_{2XH} \cdot \frac{\omega}{\omega_{HAY}}$ , где  $\omega_{HAY}$  - начальная скорость ослабления поля.

Механическая характеристика M = f(s) системы ПЧ – АД рассчитывается для частоты  $f_{\rm H} = f_{\rm H} = 50$  Гц по выражению

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

Задаемся скольжением в пределах S = 0.01, 0.02....1 и рассчитываем характеристику M = f(s) (рисунок.1.10), где  $\omega = \omega_0 \cdot (1-s)$ 



Рисунок. 1.11 Механическая характеристика системы ПЧ – АД

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\Im M H} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^{2} \cdot R_{2}^{'}}{\omega_{0} \cdot s_{H} \cdot \left[ (X_{KH})^{2} + (R_{1} + \frac{R_{2}^{'}}{s_{H}})^{2} + (\frac{R_{1} \cdot R_{2}^{'}}{s_{H} \cdot X_{\mu}})^{2} \right]} = \frac{3 \cdot 220^{2} \cdot 23,12}{314,14 \cdot 0,077 \cdot \left[ (44,11^{2} + (23,9232 + \frac{21,1188}{0,09})^{2} + (\frac{23,9232 \cdot 21,1188}{0,09})^{2} \right]} = 1,495 \text{ H} \cdot \text{M}.$$

Момент трения на валу двигателя

$$M_{\rm C \ ДB} = M_{\rm ЭM \ H} - M_{\rm ДB \ H} = 1,495 - 1,3 = 0,195 \ {\rm H} \cdot {\rm M}$$

Электромеханическая характеристика I<sub>1</sub>(s) разомкнутой системы ПЧ-

АД рассчитывается для значения частоты  $f_{\rm M}=f_{\rm 1H}=50$  Гц по выражению

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

$$I_{2}(s) = \frac{U_{1\Phi H}}{\pm \sqrt{(R_{1} + \frac{R_{2}}{s_{H}})^{2} + (X_{KH})^{2} + (\frac{R_{1} \cdot R_{2}}{s \cdot X_{\mu}})^{2}}} = \frac{220}{\pm \sqrt{(23,92 + \frac{23,12}{0,09})^{2} + (44,11)^{2} + (\frac{23,92 \cdot 23,12}{0,09 \cdot 285,96})^{2}}} = 0,7718 \text{ A};$$

$$\sin \varphi_{2}(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(R_{1} + \frac{R_{2}}{s_{H}})^{2} + (X_{KH})^{2}}} = \frac{44,11}{\sqrt{(23,92 + \frac{23,12}{0,09})^{2} + (44,11)^{2}}} = 0,1552;$$

$$I_{0} = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{R_{1}^{2} + (X_{1} + X_{\mu})^{2}}} = \frac{220}{\sqrt{23,92^{2} + (19,28 + 285,96)^{2}}} = 0,67 \text{ A}.$$

По результатам расчета строится электромеханическая характеристика  $\omega(I_1)$  (рисунок. 1.11).



системы ПЧ-АД

Определение заданной области работы:

В плоскости механических характеристик  $\omega(M)$  (рис. 1.10) наносятся граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{\rm C MH}(\omega) = 0,06 \text{ H} \cdot \text{m};$$
$$M_{\rm C MAKC}(\omega) = 0,6 \text{ H} \cdot \text{m};$$
$$M_{\rm 2H MAKC}(\omega) = 2,3 \text{ H} \cdot \text{m}.$$

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

в зоне работы с номинальным потоком при (  $f_{\rm H} \le f_{\rm 1H}$  )

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot (0, 5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}})$$
 при  $\omega \le 0, 5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}$ ;  
 $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}}$  при  $0, 5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \le \omega_{\text{дв.н}}$ ;  
 $M_{\text{дв.длит.доп}} = 291,14 \text{ H} \cdot \text{м}$  при  $0, 5\omega_{\text{дв.н}}$ .

Результаты расчета сведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета зависимости  $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$ 

<i>w</i> , рад/с	0	$\omega_{_{ m ЭП}_{ m MH}}$	$0,5\omega_{ m de}$	$\omega_{_{\rm ЭП}{ m MA}}$
$M_{\rm ABAJUT AOD}, H$	0.6			
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	5	0.68	1.3	1.3

Рассчитывается и строится зависимость максимально допустимого момента  $M_{\rm дв \ MAKC}(\omega)$ :

в зоне работы с номинальным потоком при  $f_{\rm H} \le f_{\rm 1H}$  и  $\omega \le \omega_0 \cdot (1 - S_{\rm K})$ 

$$M_{\text{ДВ МАКС}}(\omega) = M_{\text{K}} \Big|_{f_{\text{H}} = f_{\text{H}}} = \text{const},$$

$$M_{\text{K}} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi\text{H}}^{2}}{2 \cdot \omega_{0} \cdot \left\{ R_{1} + \sqrt{(R_{1}^{2} + X_{\text{KH}}^{2}) \cdot \left[1 + (\frac{R_{2}}{X_{\mu}})^{2}\right]} \right\}} =$$

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

Результаты расчета сведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчета зависимости  $M_{_{\mathcal{AB}MAKC}}(\omega)$ 

<i>w</i> , рад/с	0	$arnothing_{ m ЭП MИH}$	$0,5\omega_{ m {}_{ m {}_{ m {}_{ m {}_{ m BH}}}}$
$M_{ m дв.макс}$ , Н $\cdot$ м	3,11	3,11	3,11

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

в зоне работы с номинальным потоком ( $f_{\rm H} \le f_{\rm 1H}$ )

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \cdot (0.5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{двн}}}) \quad \text{при} \quad \omega \le 0.5 \cdot \omega_{\text{дв н}};$$
$$I_{\text{дв.длит.доп.}}(\omega) = I_{\text{двн}} \quad \text{при} \quad 0.5 \cdot \omega_{\text{дв н}} < \omega \le \omega_{\text{дв н}};$$
$$I_{\text{дв.длит.доп.}} = I_{\text{двн}} = 1,062 \text{ A} \quad \text{при} \quad 0.5 \cdot \omega_{\text{дв н}} < \omega \le \omega_{\text{дв н}}.$$

Результаты расчета сведены в таблице 10

Таблица 10 – Результаты расчета зависимости  $I_{\text{дв.длит.доп.}}(\omega)$ 

<i>ю</i> , рад/с	0	$\omega_{_{ m ЭП MИH}}$	0,5 $\omega_{_{\rm ДВ H}}$	$\omega_{_{\rm ЭП MAKC}}$
<i>I</i> <sub>дв.длит.доп.</sub> , А	0.531	0.56	1.062	1.062

Рассчитывается и строится зависимость  $I_{C MAKC}(\omega)$ , соответствующая длительной максимальной нагрузке  $M_{C MAKC}(\omega)$ =const. Для этого необходимо на естественной характеристике  $M(\omega)$  определить соответствующее  $M_{CMAKC}$  значение скольжения  $S_{T5}$ , решив относительно S уравнение:

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

и далее рассчитать значение тока  $I_{C \text{ MAKC}} \Big|_{f_{\text{H}}=f_{\text{H}}}$  и скорости  $\omega_{\text{T5}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{T.5}})$ .

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

$$I_{\text{СМАКС}}(\omega) = I_{\text{СМАКС}} \Big|_{f_{\text{H}} = f_{\text{IH}}} \quad \text{при} \quad \omega \le \omega_{\text{T5}};$$
$$I_{\text{СМАКС}}(\omega) = I_{\text{СМАКС}} \Big|_{f_{\text{H}} = f_{\text{IH}}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{T5}}} \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{\text{T5}}$$

Решив уравнение относительно s, получаем  $s = s_{T.5} = 0,032$ . Тогда  $\omega_{T5} = 314,14 \cdot (1-0,032) = 303,968$  рад/с ,  $I_{CMAKC}(\omega_{T5}) = 0,7428$  А.

Результаты расчета сведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчета зависимости  $I_{\mbox{\tiny CMAKC}}(\omega)$ 

<i>ω</i> , рад/с	<i>Ф</i> <sub>ЭП МИН</sub>	<i>W</i> <sub>T.5</sub>
$I_{\rm CMAKC},{ m A}$	0.7428	0.7428

$$\frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^{2} \cdot R_{2}^{'}}{\omega_{0} \cdot s \cdot \left[ (X_{KH})^{2} + (R_{1} + \frac{R_{2}^{'}}{s})^{2} + (\frac{R_{1} \cdot R_{2}^{'}}{s \cdot X_{\mu}})^{2} \right]} = M_{\Im \Pi M A K C}$$

и далее рассчитать значение тока  $I_{\Im\Pi MAKC}\Big|_{f_{H}=f_{\Pi H}}$ , и значение скорости

$$\omega_{\text{T14}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{T.14}})$$

$$I_{\text{ЭПМАКС}}(\omega) = I_{\text{ЭПМАКС}} \Big|_{f_{\text{H}} = f_{\text{1H}}} \Pi \text{ри} \quad \omega \le \omega_{\text{T14}};$$

$$I_{\text{ЭПМАКС}}(\omega) = I_{\text{ЭПМАКС}} \Big|_{f_{\text{H}} = f_{\text{1H}}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{T14}}} \Pi \text{ри} \quad \omega > \omega_{\text{T14}}.$$

Решив уравнение относительно *S*, получаем  $S = S_{T.5} = 0,17$ . Тогда  $\omega_{T5} = 314,14 \cdot (1-0,17) = 259,66$  рад/с ,  $I_{ЭПМАКС}(\omega_{T15}) = 1,58$  А.

Результаты расчета сведены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчета зависимости  $I_{\text{ЭПМАКС}}(\omega)$ 

<i>ω</i> , рад/с	$\omega_{_{ m SII MUH}}$	$\omega_{\mathrm{T.14}}$
$I_{\rm EHMAKC}, A$	1.58	1.58



Рисунок. 1.13. Механические характеристики электропривода и нагрузки при векторном управлении



Рисунок 1.14 Электромеханическая характеристика электропривода и нагрузки при векторном управлении

## 1.3.8 Выводы по разделу

В соответствие с ТЗ был выбран двигатель АИР-63А2, исходя из ТЗ был выбран вентилятор типа *Vortice* E354. Для двигателя АИР-63-А были рассчитаны статические и динамические характеристики для системы с векторным управлением.

2 Исследование тепловых и магнитных процессов в рабочих и аварийных режимах работы асинхронного двигателя

### 2.1 Постановка задачи

Исследование режимов работы асинхронного двигателя обуславливает необходимость моделирования процессов, происходящих в двигателе при работе в аварийном режиме. Моделирование дает возможность при заданных параметрах режима работы, определенных граничных условиях и прочих допущениях сымитировать распределение магнитного и теплового поля в двигателе. Данная модель позволит наглядно увидеть смещение концентраций магнитного потока, а также сделать прогноз по нагреву двигателя в данном режиме.

2.2 Математическое моделирование магнитных процессов асинхронного двигателя

2.2.1 Анализ программных продуктов и выбор среды программирования.

При моделирования магнитных и тепловых процессов двигателя для наглядности результатов можно представить электрическую машину в виде двухмерной модели поперечного сечения АД. Т.к все процессы на протяжении всей длины статора и ротора проходят одинаково, для представления результатов и оценке процессов, проходящих внутри машины будет достаточно двухмерного изображения. Для построения электромагнитных полей подходит программный продукт Elcut. Программа Elcut позволяет создавать только двухмерные модели, что не приемлемо при дальнейшем совершенствовании модели и усложнении расчета. Анализ результатов теплопередачи и механики являются вспомогательными, а в исследуемой модели процессы теплопередачи являются основными.

Для моделирования магнитных полей и теплопередачи был выбран программный продукт COMSOL Multiphysics. Это один из самых

современных продуктов, позволяющий объединить в модели самые различные физические процессы. Имеет мощный вычислительный аппарат и создает модели, близкие к реальным процессам. Программа позволяет самостоятельно создавать геометрию изучаемой модели, задавать граничные условия, задавать материалы и их свойства. Преимущество данного продукта перед остальными состоит в широком выборе используемых физических процессов в рамках рассматриваемой модели. Также программа имеет набор решателей, позволяющих решать как стационарные, так и временные задачи. В процессе обработки результатов имеется возможность построения графиков, поверхностей, полей.

## 2.2.2 Описание опорной модели АД

В основу построенной модели была заложена модель представленная в [20], структурная схема которой изображена на рисунке 2.1.





Геометрические размеры изображенные на схеме представлены в таблице 13

таблица 13

R1, см	R2, см	R3, см	R4, см	R5, см
2	3	3,2	5,2	5,7

Физические свойства материалов представлены в таблице 14

Таблица 14

Проводимо сть стали ротора,	Проводимо сть стали статора,	Проводимо сть алюминия	Относитель ная магнитная
См/м	См/м	ротора, См/м	проницаемость статора и ротора
1,60·10 <sup>6</sup>	0 (шихтованная сталь)	3,72·10 <sup>7</sup>	30

Обмотки двигателя в модели представлены в виде одного витка и охватывают 45 градусов, расположены под углом 60°. Плотность тока обмоток в рамках модели является константой и равна  $J = 310 A / \text{ см}^2$ . Токи в обмотках смещены на 120°.

## 2.2.3 Построение модели в программной среде

Программная среда, выбрана я для построения модели имеет структуру, изображенную на рисунке 2.2



Рисунок 2.2 Структурная схема программного пакета COMSOL

Модель построенная в программе отличается от модели описанной в пункте 2.2.2 только добавленной областью вокруг двигателя, имитирующей воздух вокруг двигателя. Воздуху присвоены свойства бесконечного элемента, т.к по нему замыкается весь магнитный поток АД. Также в модели создана имитация вращения ротора с частотой от 0 до 1200 рад/с, это позволяет в результате моделирования выявить искажение магнитного поля, создаваемое ротором.

2.2.4 Изучение процессов распределения магнитного поля АД в программной среде COMSOL.

Для начала изучения магнитных процессов АД проходящих в аварийном режиме работы, нужно построить картину распределения магнитного поля двигателя, работающего в нормальном трехфазном режиме, с тремя симметричными фазами (связанными или развязанными).

Для построения картины распределения поля, амплитуда и фаза токов в обмотках были заданы в соответствии с опорной моделью.

Результаты моделирования представлены в приложении 1.

Из этого следует, что при нормальном режиме работы магнитный поток распределен равномерно в зоне воздушного зазора, тем самым создается равномерно вращающееся магнитное поле и двигатель развивает номинальный момент.

Следующим этапом изучения является имитирование аварийного режима работы. Возможные неисправности АД были рассмотрены в разделе 1. При моделировании была рассмотрена ситуация обрыва одной фазы двигателя. При обрыве одной из трех фаз, при работе двигателя со связанными фазами токи двух других фаз смещаются и становятся в противофазу. При этом ток в фазе C  $i_c=0$ , а токи в фазах A и B сдвинуты друг относительно друга на угол  $\pi$ . Результаты моделирования представлены в приложение 2.

Из этого следует, что концентрации силовых линий магнитной индукции распределяется напротив друг друга, и поле из кругового превращается в «пульсирующее», в данном режиме момент на валу двигателя падает и работать двигатель в таком режиме не может. Путем вывода двигателя из данного режима работы является переключение схемы включения двигателя в схему с «развязанными фазами» данный метод был рассмотрен в [21]. При включении двигателя по схеме с «Развязанными»

фазами, токи в обмотках смещаются на угол 2π/3 рад., при моделировании токи в обмотках A и B были заданы с данным углом отставания. Результаты моделирования изображены в приложении 3.

Из рисунка видно, что поле приняло форму, похожую на эллипс, это значит что такое поле может создавать крутящий момент, но намного меньший, чем круговое.

Наилучшим вариантом восстановления работоспособности двигателя при обрыве фазы является использование алгоритма восстановления кругового поля, разработанного в [22]. При использовании данного алгоритма токи в обмотках фазы A и B смещаются на угол π/3 рад. Результаты данного режима работы представлены в приложении 4.

По виду силовых линий индукции магнитного поля видно, что поле приобрело более округлую форму и в таком режиме двигатель может продолжать работать с определенными условиями, которые также описаны в [21].

Для наглядности результатов исследования магнитного поля асинхронного двигателя, полученные в процессе моделирования картины магнитного поля сведены в таблицу 15, в которой отображены все рассмотренные режимы работы, приведены амплитуды и фазы токов, протекающих по обмоткам, а также приведены формы поля, полученные при теоретических расчетах.

## Таблица 15

	Рабочие и аварийные состояния трехфазных двигателей переменного тока						
No	Поле в зазоре	Прямое поле	Обратное	Суммарное	Пиогранаци фазици такор	Изображения индукции	
п/п	электрической машины	ЭМ	поле ЭМ	поле ЭМ	диаграммы цазных токов	магнитного поля	
1	Круговое поле, 3 фазы, связанные или развязанные	1 $\dot{F}$ 1			$i$ $i_A$ $i_B$ $i_C$ 0 -1 2 $\pi/3$		
2	Пульсирующее поле, 2 фазы, связанные			2 1 ÷ Ė 1 2	i i i i i i i i	a definition of the second sec	
3	Эллиптическое поле, 2 фазы, развязанные		0,5 $0,5$ $0,5$ $0,5$	0,5 0,5 0,5 0,5	$i$ $i_A$ $i_B$ 0 -1 $2\pi/3$	10 <sup>1</sup> , 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	
4	Круговое поле, 2 фазы, развязанные, с алгоритмом восстановления	2/3 $2/3$ $2/3$ $2/3$ $2/3$		2/3 $2/3$ $2/3$ $2/3$ $2/3$	$ \begin{array}{c} \overset{i}{1} & \overset{i}{\mu} & \overset{i}{\mu} \\ \overset{0}{-1} & \overset{1}{-1} & \overset{1}{-1} & \overset{1}{-1} \\ \overset{\pi}{-1} & \overset{\pi}{-1} & \overset{\pi}{-1} & \overset{1}{-1} & \overset{1}{-$		

#### 2.2.5 Выводы по подразделу

Эксперимент наглядно показал зависимость формы магнитного поля от фазы токов, протекающих по обмоткам. Результаты таких исследований в дальнейшем можно использовать для разработки и совершенствования систем управления асинхронными двигателями с повышенной живучестью и в полном объеме использовать технический потенциал используемых агрегатов.

## **2.3** Моделирование процесса распределения тепла в асинхронном двигателе.

Основной задачей при проектировании двигателя является рассчитать его тепловой баланс, чтобы при всех режимах работы температура обмоток двигателя не превышала номинальной температуры класса его изоляции. В некоторых производствах двигатели работают в сложных условиях частых пусков или ударных нагрузок, при этом испытывая дополнительный нагрев. Также большое влияние на тепловой баланс оказывает температура окружающей среды, в которой находится двигатель. От температуры обмоток асинхронного двигателя напрямую зависит его срок службы, т.к при увеличении температуры изоляции на 8~10 градусов снижает срок службы изоляции вдвое, а это повышение вероятности пробоя изоляции и выхода из строя электрической машины.

2.3.1 Разработка модели для изучения процессов распределения тепла в различных режимах работы АД.

При изучении процессов нагрева двигатель можно представить как сложное тело, в котором тепло передается от одной части к другой по разным законам и зависимостям. Сложность изучаемой модели двигателя зависит от требования к точности расчетов и допустимых погрешностей. Самой простой способ представления двигателя, это представление его как одномассовое тело, в данном случае не учитывается неоднородность температур корпуса и

его отдельных частей, однако основной частью для измерения температуры является любая обмотка статора. Подробнее представление двигателя в виде одномассовой модели описано в [23].

Следующий по сложности способ представления асинхронного двигателя является двухмассовая модель АД. В данной модели двигатель представлен в виде 2 цилиндров, представляющих соответственно статор и ротор машины. Данный способ подробно описан в [24].

Трехмассовая модель помимо обмоток статора и ротора учитывает в себе роль магнитопровода стали статора. Уравнения, описывающие трехмассовую модель приведены в [25].

В четырехмассовой модели процессы теплообмена в двигателе рассматриваются ещё более подробно, чем в приведенных выше. В данной модели принимается, что в фазах двигателя протекает симметричный ток, процесс нагревания каждой из масс происходит равномерно во всем объеме. Процесс нагревания заканчивается, когда все тепло, выделяющееся в двигателе успевает рассеиваться в окружающую среду. [26].

Для изучения нагрева и охлаждения АД в разных режимах работы в данной работе была создана 3D модель, изображающая двигатель в виде 5 цилиндров. Цилиндры в свою очередь играют роль вала, K3 обмотки ротора, обмотки статора, стали статора и корпуса самого двигателя. Данная модель имеет преимущество перед трехмассовой моделью в том, что в ней учитывается передача тепла от статора к ротору. Четырёхмассовая модель предполагает наличие точных обмоточных данных, которые не всегда есть возможность узнать. В разработанной модели обмотка ротора представляется как цилиндр, площать поперечного сечения стенок которого эквивалентна площади поперечного сечения пазовой части обмотки ротора.

2.3.2 Моделирование распределения тепла двигателя в программной среде COMSOL Multiphysics.

За основу была взята модель описанная в пункте 2.2.2. Изменению подверглась только геометрия обмоток, т.к в тепловой модели важно отобразить расположение обмоток равномерно по окружности. Теплообмен с внешней средой реализован при помощи конвенции с коэффициентом теплоотдачи 160 Вт/(м·К). Плотность тока  $J = 310 A/cm^2$  была приведена к площади поперечного сечения стенок цилиндра имитирующих обмотку статора. В результате моделирования были получены картины теплового поля в различные моменты времени и график переходного процесса установления температуры обмоток.



Результаты моделирования представлены на рисунке 2.2

Рисунок 2.2 - График переходного процесса установления температуры обмотки.

Из графика переходного процесса видно, что протекающие по обмоткам двигателя токи не способствуют нагреву обмоток до критических температур. Температура поднимается на 2,6° от установившегося режима. Это объясняется высокой теплоотдачей на поверхности двигателя, данное условие может изменяться в зависимости от внешних температурных условий и от условий ухудшения охлаждения. Далее в приложении 5 представлены картины теплового поля в момент времени t = 670c.

Из рисунка видно, что температура обмотки составляет 295° К, а температура корпуса двигателя 294,75, это объясняется теплоотдачей энергии в окружающую среду. При дальнейшем изучении вопросов распределения тепла в двигателе данная модель подлежит проверке на адекватность на примере реального двигателя. Данная модель позволит проверять двигатель на нагрев, имея значение токов, примерные геометрические размеры статора и ротора, а также температуру окружающей среды.

### 2.3.3 Выводы по разделу

При выполнении поставленной задачи моделирования тепловых и процессов были получены картины магнитных магнитного поля соответствующие теоретическим исследованиям его формы при различных режимах работы. Из этого следует, что данная модель подходит для дальнейших исследований магнитного поля асинхронной машины с целью выявления более эффективных алгоритмов восстановления работоспособности и живучести электродвигателя. Построенная тепловая модель является начальной стадией изучения распределения тепла и подлежит проверке на адекватность и сравнению результатов моделирования с реальными температурами отдельных частей электрической машины.

### Список литературы:

- Электрические машины: в 2-х ч. Ч. 1: Учеб. для электротехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. /Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1987.- 319 с.: ил.
- Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа; Логос; 2000. – 607 стр.
- Петров Г.Н. Электрические машины, ч.2, Асинхронные и синхронные машины, М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, 416 с. с черг.
- Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с., нл.
- 5. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК.- СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 стр., ил.
- Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 187 с.
- Однокопылов Г.И.,Образцов К.В.,Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. //Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.
- Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Повышение живучести частотнорегулируемого асинхронного электропривода // Известия ТПУ, Изд-во ТПУ, 2005, №7, с. 143-148.
- Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Исследование в среде Matlab Simulink трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме работы // «Технические науки — от теории к практике»: материалы XVI международной заочной научно-практической конференции. — Новосибирск, 2012. — с. 125-130.

- Однокопылов Г. И., Брагин А. Д., Однокопылов И. Г., Столяров Д. П. Исследования асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2012 - №. 2 - С. 290-293.
- Chia-Chou Yeh «Induction Motor-Drive Systems with Fault Tolerant Inverter-Motor Capabilities». - Electric Machines & Drives Conference, 2007. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Marquette Univ., Milwaukee, WI Demerdash, N.A.O. V.: 2 P.: 1451 – 1458.
- Патент РФ на изобретение № 2326480, МПК Н02Н 7/09, Н02Н 7/12, Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, - № 2007112527; заявлено 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г. Бюл. №16.
- Патент РФ на полезную модель № 128421, МПК Н02Р 25/08, Н02Н 7/09, Н02Н 7/10, Асинхронный электропривод со свойством живучести / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин - № 2012153525/07; заявлено 11.12.2012 г.; опубл. 20.05.2013 г. Бюл. №14.
- 14. Принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода на основе резервных элементов [Электронный ресурс] / Г. И. Однокопылов, В. Г. Букреев, А. Д. Брагин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). 2013. Т. 322, № 4 : Энергетика. [С. 133-137]. Заглавие с титульного листа. Электронная версия печатной публикации
- 15. Брагин А.Д. Исследование отказоустойчивого электропривода на основе резервных элементов // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно-технической конференции, 27 31 мая 2013г., г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. с. 57.

- Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие. – Томск: Издво ТПУ, 20011. – 476 с.
- 17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
- 18. Воронин, П.А. Системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода: матодические указания по курсу «Системы управления электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. – 51 с.
- Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами. Часть І. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: учеб. пособие / В.В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 215 с.
- 20. [сайт] <u>http://www.compumag.org/jsite/</u> дата обращения 13.05.2016 г.
- 21. Микроэлектронные электросистемы. Применение в радиоэлектронике / Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др. Под редакцией Ю.И. Конева. - М.: Радио и связь, 1987. - 240 с.
- 22. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
- 23.Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В., Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии. – Выпуск 1/2012 (17)- 87 с.
- 24. Анучин А.С., Федорова К.Г., Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, ГОУ ВПО ИГЭУ, 2012.

- 25.Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Кривовяз В.К., Шилин С.И. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: Учебное пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. Гос. Проф. – пед. Ун-т». 2008.- 14с.
- 26.Моисеев В.О., Омельченко Е.Я., Тележкин О.А. Исследование четырехмассовой модели асинхронного двигателя. – ФГБОН ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова.
- 27.ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 28. СНиП П-12-77. Защита от шума.
- 29. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
- 30. ГОСТ 12.4.011-89 Средства защиты работающих.
- 31.ГОСТ 12.1.019–79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 32.ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003.
- 33. ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда.



Рисунок 1 - Результат моделирования индукции магнитного поля трехфазного симметричного режима работы со связанными или развязанными фазами



Рисунок 1 - Моделирование индукции магнитного поля в двухфазном режиме работы



Рисунок 1 - Результат моделирования индукции магнитного поля в двухфазном режиме с развязанными фазами



Рисунок 1 - Результат моделирования индукции магнитного поля в двухфазном режиме с развязанными фазами при использовании алгоритма восстановления кругового поля



Рисунок 1 - Картина теплового поля в момент времени 670 с.