

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

Институт кибернетики

Направление подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра систем управления и мехатроники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирование бездатчиковой системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

УДК 621.313.323:681.51.001.63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН	Тухватулина Лилия Равильевна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Невский Егор Сергеевич	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Разрабатывать математические модели составных частей объектов профессиональной деятельности методами теории автоматического управления.
P2	Применять необходимые для построения моделей знания принципов действия и математического описания составных частей мехатронных и робототехнических систем (информационных, электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники).
P3	Определять характеристики объектов профессиональной деятельности по разработанным моделям.
P4	Разрабатывать макеты информационных, электромеханических, электрогидравлических, электронных и микропроцессорных модулей мехатронных и робототехнических систем.
P5	Применять контрольно-измерительную аппаратуру для определения характеристик и параметров макетов.
P6	Выполнять расчетно-графические работы по проектированию информационных, электромеханических, электрогидравлических, электронных и микропроцессорных модулей мехатронных и робототехнических систем.
P7	Разрабатывать конструкторскую проектную документацию электрических и электронных узлов (включая микропроцессорные) мехатронных и робототехнических систем, принципиальные электрические схемы, печатные платы, схемы размещения, схемы соединения.
P8	Участвовать в проведении предварительных испытаний составных частей опытного образца мехатронной или робототехнической системы по заданным программам и методикам и вести соответствующие журналы испытаний.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P9	Обладать способностью владеть культурой мышления, способен к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения
P10	Обладать способностью уметь использовать нормативные правовые документы в своей деятельности.
P11	Обладать способностью иметь навыки работы с компьютером как средством управления информацией.
P12	Обладать способностью владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P13	Обладать способностью владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.

P14	Обладать способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применяет методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P15	Обладать способностью понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны.
P16	Обладать способностью владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

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

Институт кибернетики

Направление подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

_____ Губин В.Е.
(Подпись) _____ (Дата) _____ (ФИО)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕЗ1	Рыбак Анна Дмитриевна

Тема работы:

Проектирование бездатчиковой системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Исходные данные к работе	Синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов: <ul style="list-style-type: none">• Мощность двигателя: 1,5 кВт;• Частота вращения двигателя – 1500 об/мин;• Количество пар полюсов – 3;• Номинальный ток – 2,9 А;• Напряжение питания – 380 В;• КПД – 90%;• Момент номинальный – 1,4 Н·м
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Разработать систему управления без датчика положения ротора синхронным электродвигателем с постоянными магнитами в режимах контроля тока, скорости с необходимыми защитами. Перерегулирование скорости не должно превышать 10%, максимальное время пуска – 0,1 с. Исследовать разработанную систему на модели.

	Использовать графическую среду имитационного моделирования Matlab Simulink.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Тухватулина Лилия Равильевна, доцент каф. МЕН, к.ф.н.
Социальная ответственность	Невский Егор Сергеевич, ассистент каф. ЭБЖ

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна		

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

Институт кибернетики

Направление подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра систем управления и мехатроники

Уровень образования бакалавр

Период выполнения весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2017 г
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
Ааа	Основная часть	75
Ааа	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
Ааа	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 62 с., 9 рис., 18 табл., 21 источников, 1 прил.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, система управления, бездатчиковая система управления, математическая модель, Matlab Simulink.

Объектом исследования является синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ).

Целью работы является создание простой, удобной и надежной системы управления СДПМ без использования датчика положения ротора (ДПР).

В выпускной квалификационной работе произведена разработка и исследование системы управления СДПМ без ДПР. Рассчитана экономическая эффективность использования привода на базе СДПМ без использования ДПР, оценена экологичность и безопасность проекта.

Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016; обработка формул велась в программе MathType 6.9; построение функциональных и принципиальных схем, диаграмм и рисунков осуществлялось в Microsoft Visio 2016; моделирование выполнено в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink 2015.

Определения, сокращения

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами.

БДСУ – бездатчиковая система управления.

ДПР – датчик положения ротора.

АД – асинхронный двигатель.

СД – синхронный двигатель.

Асинхронный двигатель – бесколлекторная машина переменного тока, у которой отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к машине, зависит от нагрузок.

Синхронный двигатель – бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к обмотке якоря, не зависит от нагрузки в области допустимых нагрузок.

Система управления – устройство или группа устройств, которые предназначены для управления электродвигателем.

Оглавление

Введение.....	11
1. Техническое задание.....	13
1.1. Назначение и цели создания системы.....	13
1.2. Требования к системе в целом.....	13
1.3. Требования к техническому обеспечению.....	13
1.4. Требования к программному обеспечению.....	14
1.5. Требования к информационному обеспечению.....	15
2. Обзор литературы.....	16
3. Описание объекта управления.....	19
3.1. Особенности СДПМ.....	22
4. Математическое описание СДПМ.....	23
4.1. Бездатчиковая система автоматического управления.....	23
4.2. Модель СДПМ в осях α - β и расчет угла положения ротора.....	24
4.2.1. Модель неявнополюсного СДПМ в осях α - β	25
4.2.2. Модель явнополюсного СДПМ в осях α - β	26
5. Разработка электрической принципиальной схемы.....	31
5.1. Выбор микроконтроллера.....	32
5.2. Выбор драйвера двигателя.....	32
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	35
6.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	35
6.2. Технология QuaD.....	36
6.3. SWOT-анализ.....	37
6.4. Структура работ в рамках научного исследования.....	40
6.5. Определение трудоемкости выполнения работ.....	41
6.6. Разработка графика проведения научного исследования.....	43
6.7. Основная заработная плата исполнителей системы.....	44
6.8. Дополнительная заработная плата исполнительной системы.....	46
6.9. Отчисления во внебюджетные фонды.....	46
6.10. Накладные расходы.....	47
6.11. Формирование бюджета затрат научно-исследовательской работы.....	47
6.12. Определение ресурсоэффективности проекта.....	48
7. Определение ресурсоэффективности проекта.....	50
7.1. Производственная безопасность.....	50
7.2. Опасные и вредные факторы аппаратной части системы.....	51
7.3. Опасные и вредные факторы программной части системы.....	53

7.4. Положительные факторы внедрения системы.....	54
7.5. Экологическая безопасность	54
7.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	54
7.7. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	55
Заключение.....	57
Список публикаций студента	58
Список используемой литературы.....	59
Приложение А. Электрическая принципиальная схема	62

Введение

В настоящее время основная цель разработки электродвигателей переменного тока направлена на увеличение их надежности, уменьшение массогабаритных показателей, стоимости и эксплуатационных расходов. Развитие современных многоуровневых автоматизированных систем в настоящий момент прогрессирует, как на уровне верхнего диспетчерского контроля, так и на уровне исполнительных механизмов.

Разнообразие современных типов электродвигателей приводит к вопросу, какой из двигателей является наиболее подходящим для разрабатываемого электропривода. Двигатели постоянного тока зачастую являются дорогостоящими, громоздкими и ненадежными из-за наличия щеточно-коллекторного узла, который требует регулярного профилактического обслуживания. Поэтому основное сравнение проводится между СДПМ и асинхронными двигателями (АД).

Как и все синхронные машины, СДПМ имеет высокий коэффициент мощности, что обеспечивает снижение потребляемого тока, а также уменьшение потерь. В сравнении с АД, имеющим ту же мощность, КПД синхронного двигателя (СД) будет выше, это проиллюстрировано на рисунке 1 [1].

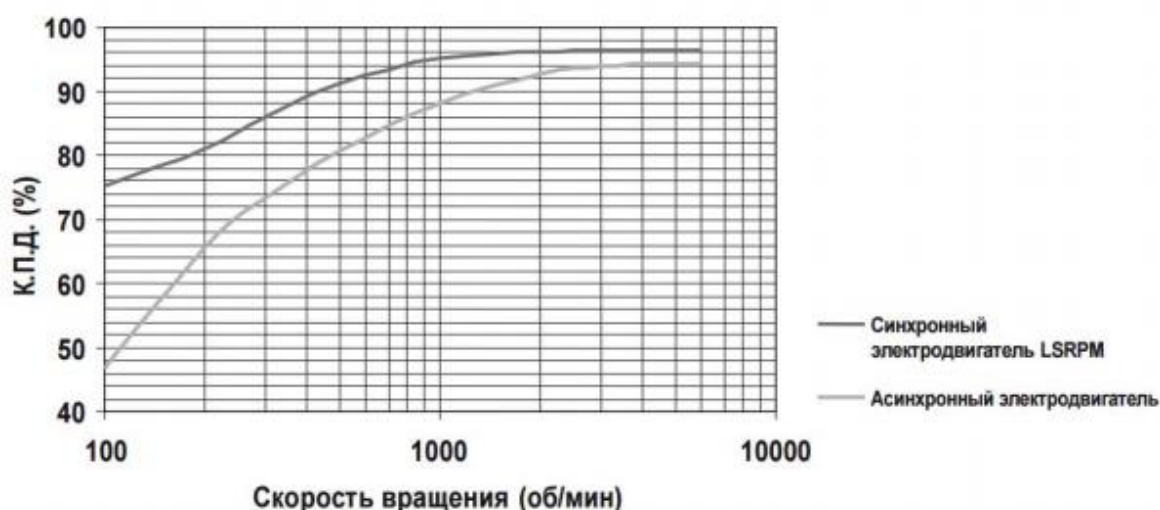


Рисунок 1 – Зависимость КПД СД и АД от скорости вращения

СД широко распространены в промышленности для электроприводов, которые работают с постоянной скоростью. Также встречаются СД в качестве приводов насосов большой мощности и длительного режима работы. В

последнее время, вследствие появления преобразовательной полупроводниковой техники, разрабатываются регулируемые синхронные электроприводы (с частотными преобразователями), в настоящее время существуют сервоприводы с СД. Все это существенно расширяет сферу применения СД в наше время.

Применение СДПМ набирает всё большую популярность ввиду наличия явных преимуществ. Согласно проведенным исследованиям энергетических показателей СДПМ и их сравнение с АД выявлена следующая закономерность: двигатели с постоянными магнитами на 5-10% превосходят по КПД АД и СД при полной нагрузке и на 15-30% - при неполной. Эти данные согласуются с компанией DRS Power Technologis. Эффективность обеспечивается за счет полного возбуждения ротора без тока и отсутствия соответствующих потерь на всех скоростях.

Наличие ДПР на электродвигателе значительно увеличивает стоимость, усложняет конструкцию и снижает надежность электропривода в целом. Что более важно, область применения такого рода электродвигателей ограничивается, так как в жидкостных, химически активных, радиоактивных средах, а также в мобильных агрегатах часто оказывается невозможным или малоэффективным применение датчиков, конструктивно связанных с электродвигателем, в том числе в глубинных погружных электронасосах для добычи нефти, в подводных аппаратах, в атомных реакторах, в электромобилях, специальных роботах, в бортовой автоматике и т. д.

Таким образом, направлением наиболее динамичного развития привода с СД является создание "бездатчиковых" систем, не содержащих ДПР, в качестве которого традиционно применяются фотоэлектрические инкрементальные энкодеры. Существует большое множество методов управления. Абсолютное большинство из них основаны на косвенном определении электрического положения ротора двигателя по направлению изображающего вектора составляющей магнитного потока сцепления якоря.

1. Техническое задание

1.1. Назначение и цели создания системы

БДСУ СДПМ предназначена для:

- пуска СДПМ с минимальными затратами энергии и времени;
- поддержания синхронной скорости вращения исполнительного механизма;
- управления исполнительным механизмом как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме;
- определение аварийных ситуаций и защиты основного и вспомогательного технологического оборудования.

Основные цели создания системы:

- обеспечение оптимального режима работы СДПМ;
- обеспечение надежной и безаварийной работы СДПМ;
- обеспечение оперативного контроля технологических параметров процесса.

1.2. Требования к системе в целом

Система управления должна обеспечить следующее:

- запуск двигателя (старт);
- остановка двигателя (стоп);
- реверсивное движение;
- увеличение скорости вращения двигателя;
- уменьшение скорости вращения двигателя;
- работа в аварийном режиме.

Аварийный режим функционирования системы характеризуется отказом одного или нескольких компонентов программного и/или технического обеспечения. В случае перехода системы в аварийный режим БДСУ должна осуществить корректную остановку СДПМ.

1.3. Требования к техническому обеспечению

Устройство должно быть устойчиво к следующим воздействиям:

- рабочая температура – от -40 °С до +40 °С;
- относительная влажность воздуха – более 80 % при температуре 35 °С;
- атмосферное давление – от 630 мм. рт. ст. до 800 мм. рт. ст.

Программно-технический комплекс БДСУ должен допускать возможность модернизации, наращивания и развития системы и дополнительно иметь резерв по каналам ввода-вывода не менее 20 %.

Используемые в системе датчики должны отвечать требованиям взрывобезопасности. Чувствительные элементы датчиков должны быть выполнены из коррозионно-стойких материалов, так как соприкасаются с агрессивной средой. Электрические цепи должны быть искробезопасными.

Все датчики, используемые в системе, должны иметь стандартные сигналы:

- 4 – 20 мА;
- 0 – 10 В.

Микроконтроллер синрродолжен иметь необходимые интерфейсы для передачи данных на верхний уровень системы Ethernet.

Техническое обслуживание заключается в систематическом наблюдении за правильностью эксплуатации, регулярном техническом осмотре и своевременном устранении неисправностей.

1.4. Требования к программному обеспечению

Программные средства системы должны отвечать следующим требованиям:

- функциональная полнота;
- надежность (в том числе восстанавливаемость);
- модифицируемость;
- модульность построения;
- удобство применения.

Программное обеспечение должно обеспечивать:

- управление исполнительным механизмом;
- регистрацию параметров, которые характеризуют технологический процесс;
- конфигурирование алгоритмов управления и защиты;
- индикацию аварийных ситуаций.

Средства создания программ для ПЛК должны включать в себя языки программирования, которые соответствуют стандарту МЭК 61131-3.

1.5. Требования к информационному обеспечению

По результатам проектирования должны быть представлены:

- состав, структура и способы организации данных в системе;
- порядок информационного обмена между компонентами и составными частями системы;
- структура процесса сбора, обработки, передачи информации в структуре;
- порядок организации базы данных реального времени и архивных данных;
- информационные массивы, включая входную информацию в виде аналоговых и цифровых сигналов; результаты расчета и наиболее важные промежуточные результаты, справочную информацию.

2. Обзор литературы

Основным элементом современного электропривода является система управления электродвигателем: частотный преобразователь или сервопривод. Преобразователь частоты позволяет управлять моментом и скоростью вращения электродвигателя и исполнительного механизма. Для решения задач регулирования скорости и момента используют два основных метода частотного управления – скалярное и векторное управление. Современные высокопроизводительные методы управления двигателями переменного тока основываются в основном на векторном управлении [2].

Главная идея векторного управления заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и фазу. При этом выделяют два способа векторного управления – датчиковый и бездатчиковый. В первом способе управление осуществляется на основании обратной связи по датчику положения или скорости. При бездатчиковом способе управления информация о положении ротора вычисляется математически в режиме реального времени на основании той информации, которая имеется в системе управления [3].

Задачу бездатчикового управления можно разделить на несколько основных этапов:

1. определение положения ротора для запуска электродвигателя;
2. управление скорости вращения на валу электродвигателя.

Рассмотрим способы определения начального положения ротора СДПМ. Один из способов, разработанный P.B. Schmidt, M.L. Gasperi, G. Ray, A.H. Wijenayake, заключается в применении несимметричности магнитной системы электродвигателя, а также в зависимости индуктивностей обмоток статора от положения ротора. Основным недостатком данного метода является существенное техническое и алгоритмическое усложнение электропривода. Это увеличивает стоимость и снижает надежность электропривода [4].

Следующий способ, разработан Вуаля Жан-Пьером. Он заключается в том, что на вход как минимум одной из обмоток подается первый переменный сигнал

определенной частоты и снимается сигнал на выходе этой обмотки. Такие измерения осуществляются попеременно на обмотках статора и получаются три периодические кривые, по которым определяется положение ротора. Недостаток этого метода заключается в сложной аппаратной реализации, т.е. в уменьшении надежности электродвигателя [5].

Следующим является способ авторов D. Basic, F. Malrait, P. Rouchon, который основан на инъекции низкочастотных токов в обмотки статора и возбуждении малых колебаний ротора. В состав электропривода вводят дополнительные устройства для формирования низкочастотных колебаний и устройств спектрального анализа. Таким образом надежность системы понижается [6].

Наиболее современным является способ, предложенный Волокитиным В.Н. и Васильевым Е.М, который заключается в подаче пробного воздействия (кратковременный пуск двигателя). Затем на основе измеренных мгновенных значений фазовых токов и напряжений вычисляется положение ротора. К недостатку данного метода относится ошибка, которая возникает в процессе определения нового начального угла и достигает 0,5 углового перемещения ротора в результате пробного пуска [7].

Рассмотрим способы управления скоростью СДПМ. Наиболее широко распространенным в системах векторного управления получил способ ориентации переменных по полю, описанный Виноградовым А.Б. Недостатком этого метода является то, что вектора на комплексной плоскости для трехфазных токов и напряжений статора преобразуют в двухфазную ортогональную систему координат, это приводит к неточностям в системе. Также не учитывается тип обмоток статора и связанное с этим несинусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя [8].

Следующий способ описан Козяруком А.Е. Здесь используются выражения для преобразования трехфазных токов в двухфазную систему для идеализированной машины, которая имеет синусоидальное распределение магнитной индукции в зазоре машины. Аналогичные преобразования

выполняются для напряжения статора, магнитных потоков статора и ротора. Недостаток этого способа аналогичен предыдущему способу – неточность регулирования [9].

Одним из самых современных является способ, предложенный Афониним В.В. и Захаржевским О.А. Здесь повышается точность регулирования скорости вращения и момента вращения трехфазного двигателя за счет более точного учета параметров конкретного двигателя при преобразовании координат (т.е. вводятся поправочные коэффициенты и поправочные функции). Неточности остаются, но в меньшем объеме, а также увеличивается сложность вычислений [10].

В разрабатываемой бездатчиковой системе управления СДПМ начальное положение ротора будет определяться при помощи подачи тестового сигнала на статор машины. По полученным мгновенным значениям фазных токов и напряжений и специального алгоритма анализа отклика на него вычисляется положение ротора. Управление скоростью осуществляется на основе способа Афонина В.В. и Заржевского О.А., где более точно учитываются параметры двигателя.

3. Описание объекта управления

Принцип действия СД основан на взаимодействии вращающегося переменного магнитного поля якоря и постоянных магнитных полей полюсов индуктора. Обычно якорь расположен на статоре, а индуктор — на роторе. Именно конструкция ротора и определяет наиболее существенное отличие СД от АД.

СД несколько сложнее, чем АД, но обладает рядом преимуществ, что позволяет применять его в ряде случаев вместо АД:

1. СД может работать, не потребляя и не отдавая реактивной энергии в сеть, при коэффициенте мощности равным единице. В этих условиях работающий СД нагружает сеть только активным током (у асинхронного обмотка рассчитывается на активный и реактивный токи). Таким образом, при одинаковой номинальной мощности габариты СД меньше, а его КПД выше, чем АД.

2. СД менее чувствительны к колебаниям напряжения сети, чем АД.

3. СД имеют высокую перегрузочную способность. Кроме того, перегрузочная способность СД может быть автоматически увеличена за счет повышения тока возбуждения.

4. Скорость вращения СД остается неизменной при любой нагрузке на валу в пределах его перегрузочной способности [11].

Как было сказано выше, отличительной особенностью данного электродвигателя считается конструкция ротора, в составе которого используются высококоэрцитивные постоянные магниты. Их применение в магнитной системе электромеханических устройств определяет ряд преимуществ, таких как:

1. повышение энергетических характеристик по сравнению с традиционными электромеханическими системами при одинаковых массогабаритных показателях;

2. отсутствие необходимости во внешних источниках тока для создания основного магнитного потока;

3. простота конструкции и технологичность изготовления.

Конструкция электродвигателя содержит два основных элемента - статор и ротор. Ротор выполнен из немагнитного металлического каркаса с равномерно размещенными на нем высококоэрцитивными постоянными магнитами. При этом металлический токопроводящий каркас одновременно выполняет роль демпфера для успокоения колебательных процессов в переходных режимах работы СД. Металлический каркас с расположенной на нём шестью полюсной магнитной системой напрессован на вал двигателя.

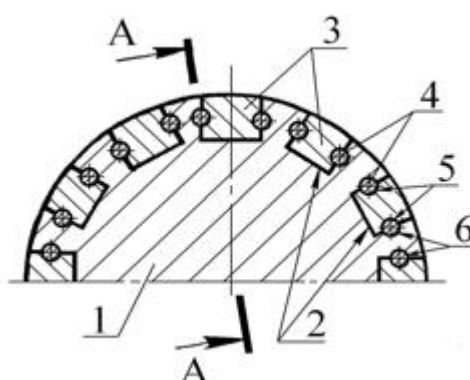


Рисунок 2 – Часть ротора

Ротор содержит магнитопровод 1 с продольными пазами 2, в которые установлены постоянные магниты 3. Магниты крепятся в пазах средствами фиксации 4, в форме стержней (или проволоки), установленными в продольные канавки 5 на боковой поверхности магнитов 2 и продольные канавки 6 на боковой поверхности продольных пазов 3. Концы средств фиксации соединяются между собой посредством колец 7, установленных по торцам ротора, и образуют единый замкнутый контур. Средства фиксации и кольца выполнены из меди или другого диамагнитного материала. Образованный контур из диамагнитного материала снижает магнитные потоки рассеяния и создаёт короткозамкнутую обмотку, которая позволяет осуществлять прямой асинхронный пуск в малоинерционных электродвигателях, а также демпфирование раскачки ротора при работе электрической машины в синхронном режиме.

Статор представляет собой магнитопровод с трехфазной обмоткой, соединенной по схеме «звезда». Подав трёхфазное переменное напряжение,

создаем в итоге вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем ротора и создает крутящий момент. Частота вращения ротора совпадает с частотой вращения магнитного поля, по этой причине сам привод называется синхронным. Важной особенностью данного привода является наличие абсолютно жёсткой механической характеристики в определенном диапазоне нагрузок и питающего напряжения.

Обеспечение высоких энергетических характеристик двигателя напрямую связано с геометрией ротора, т.е. с такими данными как: заполняемость ротора магнитами, величина воздушного зазора, геометрическая форма и крепление магнитов [12].

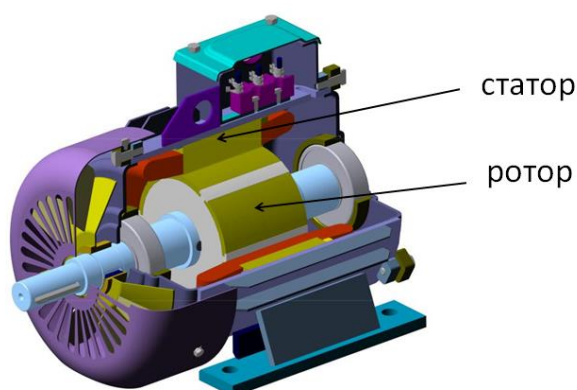


Рисунок 3 – Конструкция СДПМ

Для проведения ряда экспериментов был создан макет СДПМ мощностью 1,5 кВт (рисунок 3) со следующими параметрами:

Таблица 1 – Параметры опытного образца СДПМ

Номинальное напряжение, В	380
Номинальная мощность, Вт	1500
КПД	0,90
Номинальный ток, А	2,9
Номинальная скорость, об/с	1500



Рисунок 4 – Внешний вид опытного образца

Таким образом, БДСУ спроектирована для управления СДПМ мощностью 1,5 кВт с КПД = 90 %, описанным выше.

3.1. Особенности СДПМ

Ротор СДПМ представляет собой постоянный магнит. Ток обмотки статора создает вращающееся магнитное поле статора ($\vec{\psi}_s$), магнитные полюса которого притягивают противоположные магнитные полюса ротора. Вследствие этого возникает момент, вращающий ротор вслед за полем статора (рисунок 5) [13].

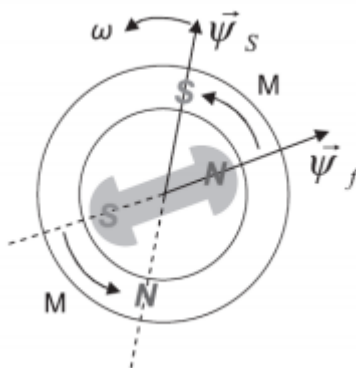


Рисунок 5 – Принцип работы СДПМ

Для СДПМ характерны низкая степень насыщения и значительный воздушный зазор. Поэтому не учитываем нелинейность магнитной цепи.

В модель синхронного электромеханического преобразователя без учета насыщения вводится ряд допущений:

1. Магнито-мягкий материал магнитопровода имеет бесконечную магнитную проницаемость;

2. Отсутствие насыщения делает все сосредоточенные электрические параметры независимыми от электрических переменных;
3. Реальные обмотки и постоянные магниты заменяются эквивалентными токовыми слоями, создающими требуемое значение и форму напряженности или магнитодвижущих сил магнитного поля в равномерном воздушном зазоре машины;
4. Запасенная магнитная энергия, используемая для описания электрической машины, рассматривается лишь как энергия статического магнитного поля;
5. Энергия электростатического считается пренебрежимо малой;
6. Постоянный магнит является идеальным источником напряженности магнитного поля и представляет собой бесконечно тонкую пластину;
7. Потери в стали отсутствуют;
8. Магнитная проницаемость воздушного зазора представляется в виде произведения магнитной проницаемости статора и ротора [14].

4. Математическое описание СДПМ

4.1. Бездатчиковая система автоматического управления

В данном проекте система управления основывается на векторном управлении. Применение БДСУ СДПМ обусловлено невозможностью физически установить ДПР на описанный выше двигатель. На рисунке 6 представлена структурная схема бездатчикового управления.

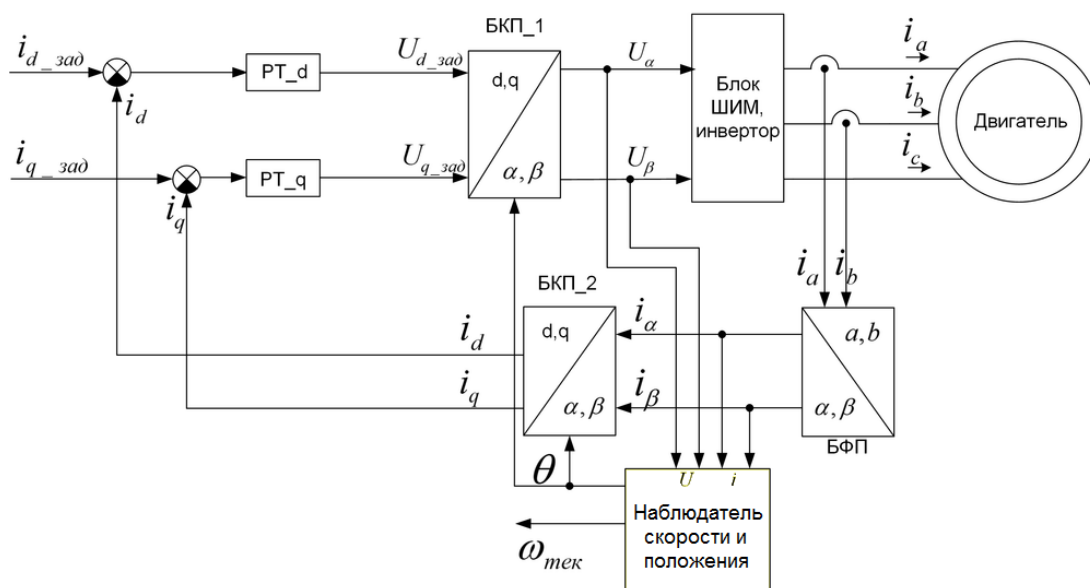


Рисунок 6 – Структурная схема бездатчикового управления

Где на рисунке 6 i_d - ток статора по оси d, i_q - ток статора по оси q, БКП_1 и БКП_2 – блоки координатных преобразований, РТ_d, РТ_q – регуляторы токов.

Наблюдатель скорости и положения представляют вычислительные устройства, в которых на основе входных данных производится оценка скорости и положения.

4.2. Модель СДПМ в осях α - β и расчет угла положения ротора

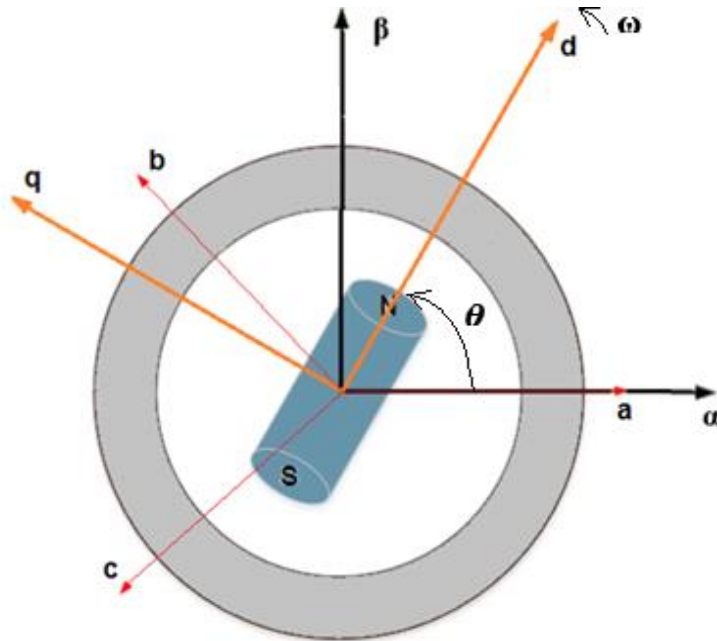


Рисунок 7 – СДПМ и связанные с ним координаты

Предположения:

- Проницаемость железа равна бесконечности (отсутствует насыщение).
- Обмотки являются синусоидально распределенными, то есть пространственными гармониками МДС пренебрегаем.
- Обмотки являются синусоидально распределенными, поэтому рассчитывается только первая гармоника.
- Обмотки симметричны, поэтому количество витков, значение сопротивления и индуктивности на обмотках равны.
- Рассматривается модель цепи с сосредоточенными параметрами.

Общее уравнение напряжения для двигателя переменного тока:

$$V_x = R \cdot i_x + \frac{d\psi_x}{dt} \quad (4.1)$$

где V_x – напряжение статора по фазе “x”;

i_x – ток статора по фазе “х”;

ψ_x – потокосцепление статора по оси “х”.

Уравнения напряжения может быть записано в стационарной системе координат (α, β) для СДПМ следующее:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt} [L_0 + L_1 \cdot \cos(2\theta)] & \frac{d}{dt} L_1 \cdot \sin(2\theta) \\ \frac{d}{dt} L_1 \cdot \sin(2\theta) & R + \frac{d}{dt} [L_0 - L_1 \cdot \cos(2\theta)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

где $L_0 = \frac{L_d + L_q}{2}$ (4.3)

$L_1 = \frac{L_d - L_q}{2}$ (4.4)

V_α, V_β – напряжение статора по осям α, β ;

i_α, i_β – ток статора по осям α, β ;

R – сопротивление статора одной фазы.

L_q, L_d – самоиндукция статора по осям d, q ;

λ_{pm} – потокосцепление постоянного магнита;

θ – угол поворота ротора относительно оси α .

Первый член правой части уравнения (4.2) содержит неизвестные переменные 2θ , это обусловлено тем, что двигатель является явнополюсным. Это делает математическую модель намного сложнее, чем у неявнополюсного двигателя.

4.2.1. Модель неявнополюсного СДПМ в осях α - β

Уравнения для неявнополюсной СДПМ в стационарной системе координат (α, β) согласно (4.2):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

где $L_d = L_q = L$.

Первый член правой части уравнения (4.5) содержит известные переменные. Неизвестные переменные есть в величине ЭДС, которая содержит угол положения ротора.

Согласно (4.1) и (4.5) можно определить потокосцепление в осях α , β :

$$\begin{aligned}\psi_\alpha &= \int (V_\alpha - i_\alpha \cdot R) dt - i_\alpha \cdot L \\ \psi_\beta &= \int (V_\beta - i_\beta \cdot R) dt - i_\beta \cdot L\end{aligned}\quad (4.6)$$

Иначе:

$$\begin{aligned}\psi_\alpha &= \int [-\omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta] dt = \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \\ \psi_\beta &= \int [\omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta] dt = \lambda_{pm} \cdot \sin \theta\end{aligned}\quad (4.7)$$

Из (4.6) и (4.7) выводим:

$$\tan \theta = \frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha} = \frac{\int (V_\beta - i_\beta \cdot R) dt - i_\beta \cdot L}{\int (V_\alpha - i_\alpha \cdot R) dt - i_\alpha \cdot L}\quad (4.8)$$

или:

$$\theta = \arctan \left[\frac{\int (V_\beta - i_\beta \cdot R) dt - i_\beta \cdot L}{\int (V_\alpha - i_\alpha \cdot R) dt - i_\alpha \cdot L} \right]\quad (4.9)$$

4.2.2. Модель явнополюсного СДПМ в осях α - β

Согласно (4.2) запишем уравнение для СДПМ:

$$\begin{aligned}V_\alpha &= i_\alpha R + \frac{d}{dt} \{ [L_0 + L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha \} + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta \} - \\ &\quad - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta\end{aligned}\quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}V_\beta &= i_\beta R + \frac{d}{dt} \{ [L_0 - L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\beta \} + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha \} + \\ &\quad + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (4.11)$$

Преобразуем (4.10-4.11) прибавлением и вычитанием части $\frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\alpha)$ для (4.10) и $\frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\beta)$ для (4.11), тогда:

$$\begin{aligned}V_\alpha &= i_\alpha R + \frac{d}{dt} \{ [L_0 - L_1 + L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\alpha) + \\ &\quad + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta \} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta\end{aligned}\quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}V_\beta &= i_\beta R + \frac{d}{dt} \{ [L_0 - L_1 - L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\beta \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\beta) + \\ &\quad + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha \} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (4.13)$$

Согласно (4.03) и (4.4) получаем:

$$L_0 - L_1 = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} = L_q \quad (4.14)$$

Подставим (4.14) в (4.12-4.13), тогда:

$$V_\alpha = i_\alpha R + \frac{d}{dt} \{ [L_q - L_1 + L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\alpha) + \\ + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta \} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.15)$$

$$V_\beta = i_\beta R + \frac{d}{dt} \{ [L_q - L_1 - L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\beta \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\beta) + \\ + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha \} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \quad (4.16)$$

Преобразуем (4.15-4.16):

$$V_\alpha = i_\alpha R + \frac{d}{dt} (L_q \cdot i_\alpha) + \left\langle \frac{d}{dt} \{ [L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\alpha) + \right. \\ \left. + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta \} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \right. \quad (4.17)$$

$$V_\beta = i_\beta R + \frac{d}{dt} (L_q \cdot i_\beta) + \left\langle \frac{d}{dt} \{ [-L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\beta \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\beta) + \right. \\ \left. + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha \} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \right. \quad (4.18)$$

Обозначим выражение в скобках “ $\langle \rangle$ ”, равное противу ЭДС или производной эквивалентного потокосцепления, тогда:

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = \frac{d}{dt} \{ [L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\alpha) + \\ + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta \} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.19)$$

$$e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta = \frac{d}{dt} \{ [-L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\beta \} + \frac{d}{dt} (L_1 \cdot i_\beta) + \\ + \frac{d}{dt} \{ L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha \} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \quad (4.20)$$

Известно, что:

$$\cos(2\theta) = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \\ \sin(2\theta) = 2 \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \quad (4.21)$$

Выполним некоторые преобразования с (4.19-4.20):

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = \frac{d}{dt} \{ [L_1 \cdot i_\alpha \cdot \cos(2\theta)] + (L_1 \cdot i_\alpha) \} +$$

$$+ \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\beta\} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.22)$$

$$e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta = \frac{d}{dt} \{[-L_1 \cdot i_\beta \cdot \cos(2\theta)] + (L_1 \cdot i_\beta)\} + \\ + \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot \sin(2\theta) \cdot i_\alpha\} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \quad (4.23)$$

Член уравнения (4.22) “ $\frac{d}{dt} \{[L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha + (L_1 \cdot i_\alpha)\}$ ” может быть преобразован с помощью (4.21), тогда:

$$\frac{d}{dt} \{[L_1 \cdot \cos(2\theta)] \cdot i_\alpha + (L_1 \cdot i_\alpha)\} = \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot i_\alpha \cdot [\cos(2\theta) + 1]\} = \\ = \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot i_\alpha \cdot [\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + \cos^2 \theta + \sin^2 \theta]\} = \\ = \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot i_\alpha \cdot 2\cos^2 \theta\} \quad (4.24)$$

Член уравнения (4.22) “ $\frac{d}{dt} \{[L_1 \cdot \sin(2\theta)] \cdot i_\beta\}$ ” может быть преобразован с помощью (4.21), тогда:

$$\frac{d}{dt} \{[L_1 \cdot \sin(2\theta)] \cdot i_\beta\} = \frac{d}{dt} [L_1 \cdot i_\beta \cdot 2 \sin \theta \cdot \cos \theta] \quad (4.25)$$

Подставим (4.24-4.25) в (4.22), получим:

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = \frac{d}{dt} [L_1 \cdot i_\alpha \cdot 2\cos^2 \theta] + \frac{d}{dt} [L_1 \cdot i_\beta \cdot 2\sin \theta \cdot \cos \theta] - \\ - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.26)$$

или:

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot 2\cos \theta \cdot [i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta]\} - \\ - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.27)$$

Это значит, что:

$$i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta = I_d \quad (4.28)$$

Подставим (4.28) в (4.27) и примем во внимание, что $\theta = \omega \cdot t$, тогда:

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = \frac{d}{dt} \{L_1 \cdot 2\cos \theta \cdot I_d\} - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta = \\ = -2L_1 \cdot \omega \cdot I_d \cdot \sin \theta - \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \sin \theta \quad (4.29)$$

В итоге ЭДС по оси α равна:

$$e'_\alpha = \frac{d}{dt} \psi'_\alpha = -[2L_1 \cdot \omega \cdot I_d + \omega \cdot \lambda_{pm}] \cdot \sin \theta \quad (4.30)$$

Проведем преобразования с уравнением (4.23).

Член уравнения (4.23) “ $\frac{d}{dt}\{-L_1 \cdot \cos(2\theta)\} \cdot i_\beta + (L_1 \cdot i_\beta)$ ” может быть преобразован с помощью (4.21), тогда:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\{-L_1 \cdot \cos(2\theta)\} \cdot i_\beta + (L_1 \cdot i_\beta) &= \frac{d}{dt}\{L_1 \cdot i_\beta \cdot [1 - \cos(2\theta)]\} = \\ &= \frac{d}{dt}\{L_1 \cdot i_\beta \cdot [\sin^2 \theta + \cos^2 \theta - \cos^2 \theta + \sin^2 \theta]\} = \\ &= \frac{d}{dt}\{L_1 \cdot i_\beta \cdot 2\sin^2 \theta\} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Член уравнения (4.23) “ $\frac{d}{dt}\{L_1 \cdot \sin(2\theta)\} \cdot i_\alpha$ ” может быть преобразован с помощью (4.21), тогда:

$$\frac{d}{dt}\{L_1 \cdot \sin(2\theta)\} \cdot i_\alpha = \frac{d}{dt}[L_1 \cdot i_\alpha \cdot 2 \sin \theta \cdot \cos \theta] \quad (4.32)$$

Подставим (4.31-4.32) в (4.23), получим:

$$\begin{aligned} e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta &= \frac{d}{dt}[L_1 \cdot i_\beta \cdot 2\sin^2 \theta] + \frac{d}{dt}[L_1 \cdot i_\alpha \cdot 2\sin \theta \cdot \cos \theta] + \\ &+ \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (4.33)$$

или:

$$\begin{aligned} e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta &= \frac{d}{dt}\{L_1 \cdot 2\sin \theta \cdot [i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta]\} + \\ &+ \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (4.34)$$

Подставим (4.28) в (4.34) и примем во внимание, что $\theta = \omega \cdot t$, тогда:

$$\begin{aligned} e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta &= \frac{d}{dt}\{L_1 \cdot 2\sin \theta \cdot I_d\} + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta = \\ &= 2L_1 \cdot \omega \cdot I_d \cdot \cos \theta + \omega \cdot \lambda_{pm} \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (4.35)$$

В итоге ЭДС по оси β равна:

$$e'_\beta = \frac{d}{dt} \psi'_\beta = [2L_1 \cdot \omega \cdot I_d + \omega \cdot \lambda_{pm}] \cdot \cos \theta \quad (4.36)$$

Найдем потокосцепление соответствующее (4.30) и (4.36):

$$\begin{aligned} \psi'_\alpha &= \int \{-\omega \cdot [2L_1 \cdot I_d + \lambda_{pm}] \cdot \sin \theta\} dt = \\ &= [2L_1 I_d + \lambda_{pm}] \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned}\psi'_\beta &= \int \{\omega \cdot [2L_1 \cdot I_d + \lambda_{pm}] \cdot \cos \theta\} dt = \\ &= [2L_1 I_d + \lambda_{pm}] \cdot \sin \theta\end{aligned}\quad (4.38)$$

Найдем отношение:

$$\frac{\psi'_\beta}{\psi'_\alpha} = \frac{[2L_1 I_d + \lambda_{pm}] \cdot \sin \theta}{[2L_1 I_d + \lambda_{pm}] \cdot \cos \theta} = \tan \theta \quad (4.39)$$

Уравнения (4.17) и (4.18) можно записать в следующем виде:

$$V_\alpha = i_\alpha \cdot R + \frac{d}{dt}(L_q \cdot i_\alpha) + \frac{d}{dt}(\psi'_\alpha) \quad (4.40)$$

$$V_\beta = i_\beta \cdot R + \frac{d}{dt}(L_q \cdot i_\beta) + \frac{d}{dt}(\psi'_\beta) \quad (4.41)$$

или:

$$\psi'_\alpha = \int (V_\alpha - i_\alpha \cdot R) dt - L_q \cdot i_\alpha \quad (4.42)$$

$$\psi'_\beta = \int (V_\beta - i_\beta \cdot R) dt - L_q \cdot i_\beta \quad (4.43)$$

В итоге, учитывая (39), угол θ может быть найден следующим образом:

$$\theta = \arctan \theta = \arctan \left[\frac{\int (V_\beta - i_\beta \cdot R) dt - L_q \cdot i_\beta}{\int (V_\alpha - i_\alpha \cdot R) dt - L_q \cdot i_\alpha} \right] \quad (4.44)$$

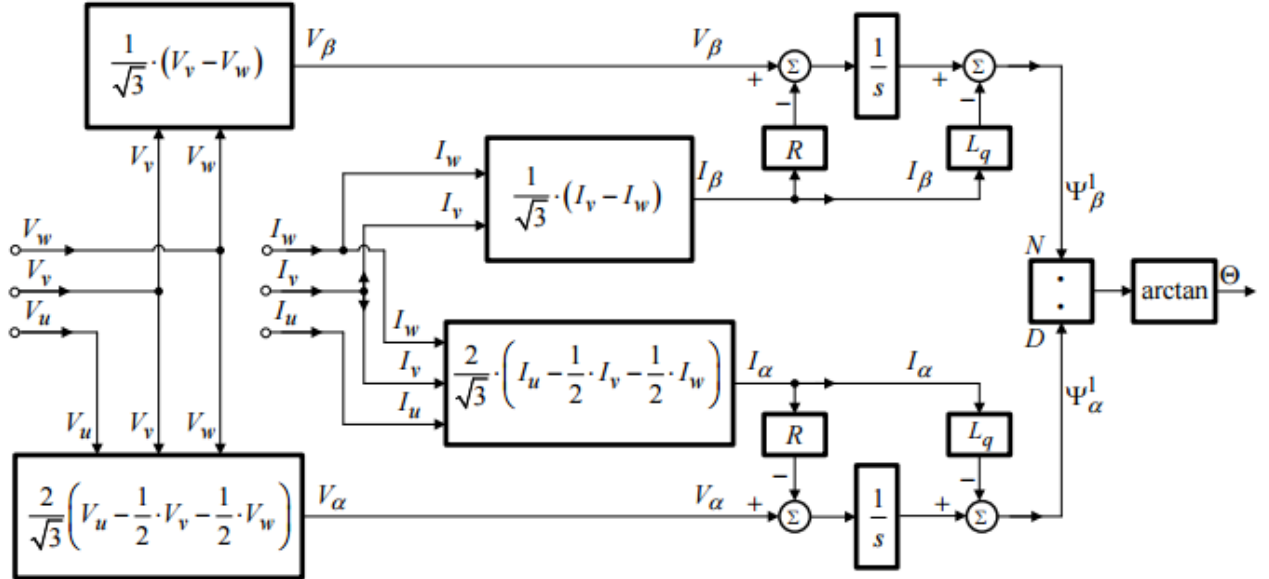


Рисунок 8 – Блок-схема наблюдателя

5. Разработка электрической принципиальной схемы

В данной схеме (Приложение А) для измерения тока в фазах А и В необходимо использовать датчики ток. Ток на фазе С получается путем вычисления по первому закону Кирхгофа. Сигналы с датчиков подаются на микроконтроллер. Питание датчиков осуществляется по общей шине от 5 В. Подберем датчики тока исходя из сравнения датчиков в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики датчиков тока

Технические параметры	INA250A2PW	ACS710KLA TR-6BB-T	ACS712ELC TR-05B-T	ACS713ELC TR-20A-T
Т _{раб min} , °С	- 40	- 40	- 40	- 40
Т _{раб max} , °С	125	125	85	85
U _{пит min} , В	2,7	3	4,5	4,5
U _{пит max} , В	36	5,5	5,5	5,5
Кол-во выводов	16	16	8	8
Полоса пропускания, кГц	50	120	80	80
Потребляемый ток, мА	0,2	11	10	10
Цена, руб.	330	300	220	370

Все датчики подходят по техническим характеристикам, поэтому выберем наиболее дешевый ACS712ELCTR-05B-T.

Для определения текущего значения напряжения в цепи используется делитель напряжения, два последовательно соединенных резистора. Входное напряжение $U_1 = 380$ В, выходное напряжение $U_2 = 5$ В, максимальный ток на входе микроконтроллера $I = 100$ мА.

Напряжение на всем участке цепи:

$$U = I \cdot (R_1 + R_2) \quad (5.1)$$

Отсюда суммарное минимальное сопротивление следующее:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 = \frac{U}{I} = \frac{380}{0,1} = 3,8 \text{ кОм} \quad (5.2)$$

Увеличим полученное значение в 2 раза, тем самым уменьшив ток на вход до 50 мА. Рассчитаем падение напряжения для делителя напряжения на резисторах.

$$R_2 = \frac{U_1}{I} = \frac{5}{0,05} = 100 \text{ Ом} \quad (5.3)$$

$$R_1 = R_{\text{общ}} - R_2 = 2 \cdot 3800 - 100 = 7500 \text{ Ом} \quad (5.4)$$

В качестве резистора R2 возьмем резистор с номиналом 100 Ом, рассчитанный на мощность 0,25 Вт. В качестве резистора R1 возьмем резистор с номиналом 7,5 кОм, рассчитанный на мощность 20 Вт.

5.1. Выбор микроконтроллера

Отличительной особенностью бездатчиковой системы управления от обычной является отсутствие ДПР. Вместо него используются наблюдатели скорости и положения, в которых вычисляется положение ротора и его скорость на основании полученных данных с датчиков тока и напряжения.

Для определения точного положения при запуске двигателя и его скорости в режиме реального времени, для управления двигателем необходим микроконтроллер с достаточной вычислительной мощностью. Для выбора микроконтроллера обратимся к сравнительной таблице характеристик.

Таблица 3 – Характеристики микроконтроллеров

Характеристики	ATtiny2313	STM8S	ATMega32
Напряжение питания, В	2,7...5,5	2,95...5,5	2,7...5,5
Тактовая частота, МГц	0...20	0...24	0...20
Число портов ввода-вывода	18	32	32
Объем FLASH – памяти, Кбайт	2	64	32
Разрядность, бит	8	8	8
Температурный диапазон, °С	-40...+85	-40...+85	-40...+85
Цена, руб	180	190	210

Проведенное сравнение показывает, что наиболее лучшим выбором будет являться микроконтроллер серии STM8S производства ST Microelectronics по быстродействию и объему памяти.

5.2. Выбор драйвера двигателя

Для управления двигателями необходимо устройство, которое бы преобразовывало управляющие сигналы малой мощности в токи, достаточные для управления двигателем. Такое устройство называют драйвером двигателей.

Для выбора драйвера для управления 3-х фазным двигателем обратимся к сравнительной таблице характеристик.

Таблица 4 – Характеристики драйверов

Характеристики	FSBS5CH60	FSB50450	FSB50250
Рабочее напряжение, В	600	500	500
Напряжение питания, В	5	5	5
Ток на выходе, А	5	3	2
Тип транзисторов	IGBT	IGBT	IGBT
Цена, руб	430	260	160

Драйвер FSB50250 не подходит, так как номинальный ток двигателя равен 2,9 А. Поэтому остановим выбор на драйвере FSB50450, который удовлетворяет характеристикам двигателя.

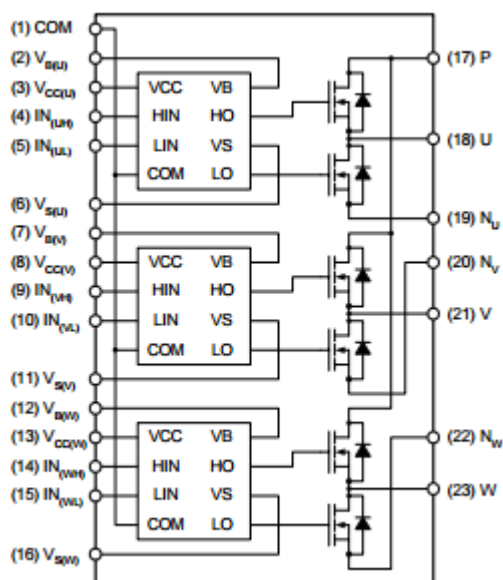


Рисунок 9 – Электрическая принципиальная схема драйвера FSB50450

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

Студенту:

Группа	ФИО
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Расчёт стоимости ресурсов НИ осуществляется по методическому указанию соответствующего раздела ВКР. Оклады берутся в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Расходование ресурсов осуществляется в соответствии с установленными нормами НИ ТПУ и ФЗ РФ от 2017 г.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Ставки налогов, дисконтирования и кредитования соответствуют ФЗ РФ от 2017 г.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценка составляется на основе карты сегментирования рынка, анализа конкурентных решений с использованием технологии QuaD и SWOT-анализа.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы; - формирование бюджета затрат НИР
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Эффективность НИ определяется на основе интегральных показателей и сравнительной эффективности исполнений НР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Оценочная карта QuaD
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НИ
5. Определение ресурсоэффективности проекта

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Тухватулина Лилия Равильевна	к.ф.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна		

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1. Потенциальные потребители результатов исследования

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

В данном случае сегментирования целесообразно провести по такому критерию, как регулирования скорости, так как для различных типов механизмов, требуется различная скорость вращения вала двигателя.

Выделим следующие сегменты рынка:

- разработка, проектирование и производство;
- установка и пуско-наладочные работы;
- дальнейшее обслуживание и ремонт.

Исходя из перечисленных сегментов рынка произведем сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Карта сегментирования рынка

	Электропривода постоянного тока	Асинхронные электропривода	Синхронные электропривода
Разработка, проектирование и производство			
Установка и пуско-наладочные работы			
Обслуживание и ремонт			

Фирма А		Фирма Б	
---------	--	---------	--

Результаты сегментирования:

- основными сегментами рынка являются все виды деятельности, связанные с электроприводами постоянного тока и асинхронными электроприводами;
- наиболее сильно предприятие должно ориентироваться на сегменты рынка, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой синхронных электроприводов.

6.2. Технология QuaD

Для гибкого измерения характеристик, которые описывают качество новой разработки и ее перспективность на рынке, воспользуемся технологией QualityADvisor. В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины показателей оценки коммерческого потенциала разработки и показателей оценки качества разработки.

Каждый показатель оценивается экспертным путем по сто балльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 6).

Таблица 6 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений QuaD

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,07	95	100	0,95	0,0665
2. Помехоустойчивость	0,1	87	100	0,87	0,087
3. Надежность	0,03	90	100	0,9	0,027
4. Унифицированность	0,09	90	100	0,9	0,081
5. Уровень материалоемкости разработки	0,06	97	100	0,97	0,0582
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	0,024
7. Безопасность	0,03	80	100	0,8	0,024
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	0,015
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	0,034
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	0,0392
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	96	100	0,96	0,0384
12. Ремонтопригодность	0,06	100	100	1	0,06
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	0,036

14. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	0,028
15. Перспективность рынка	0,09	65	100	0,65	0,0585
16. Цена	0,07	95	100	0,95	0,0665
17. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	0,027
18. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	0,039
19. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	0,0213
20. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	0,032
Итого	1				0,8626

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \sum V_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,1 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 86,26\%$$

где V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Средневзвешенное значение получилось равным 86,26%, что говорит о перспективности разработки.

6.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

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. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (таблица 7).

Таблица 7 – Сильные и слабые стороны, возможности и угрозы

Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Наличие технического задания.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл2. Большой срок выхода на рынок.
---	--

С4. Квалифицированный персонал. С5. Надежность данной системы по сравнению с другими.	Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения. Сл4. Отсутствие прототипа проекта. Сл5. Специфичность разработки.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Использование новых технологий, ускоряющих процесс производства. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В4. Повышение стоимости конкурентных разработок. В5. Развитие технологий в данной отрасли.	. Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Ограничения на экспорт технологии. У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции. У5. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.

Описание сильных и слабых сторон проекта, его возможности и угрозы происходит на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах ВКР.

Для более четкого выявления взаимосвязей в таблице SWOT-анализа перейдем ко второму этапу – составлению интерактивных матриц (таблица 8).

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	0	+	-	+	+
	В2	+	+	-	-	+
	В3	+	+	-	-	+
	В4	0	-	-	-	0
	В5	+	0	-	+	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	В1	-	-	-	+	-
	В2	+	-	0	+	-
	В3	+	-	-	0	-
	В4	-	-	0	-	-
	В5	+	0	+	+	+
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	-	-	0	-
	У2	0	0	-	+	-
	У3	-	-	-	-	0
	У4	-	-	+	0	+
	У5	-	-	0	-	-

Слабые стороны проекты						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	0	0	0	0
	У2	-	0	+	-	-
	У3	-	+	0	-	-
	У4	-	+	+	-	+
	У5	0	-	-	-	+

В рамках третьего этапа составим итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 9).

Таблица 9 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Наличие технического задания.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p> <p>С5. Надежность данной системы по сравнению с другими.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл2. Большой срок выхода на рынок.</p> <p>Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения.</p> <p>Сл4. Отсутствие прототипа проекта.</p> <p>Сл5. Специфичность разработки.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2. Использование новых технологий, ускоряющих процесс производства.</p> <p>В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p> <p>В5. Развитие технологий в данной отрасли.</p>	<p>1. Использование инновационной структуры ТПУ и новых технологий позволяет сделать разработку надежной, экологически безопасной.</p> <p>2. Стоимость разработки уменьшается за счет использования экономичных и энергоэффективных технологий.</p> <p>3. За счет повышения надежности, энергоэффективности и экологичности разработки спрос на продукт увеличивается.</p>	<p>1. В разработке БДСУ используются новые технологии.</p> <p>2. За счет использования новых технологий уменьшается количество работников для непосредственной работы с разработкой.</p> <p>3. За счет новизны разработки появляется спрос на новую продукцию.</p>

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У3. Ограничения на экспорт технологии.</p> <p>У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p> <p>У5. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>	<p>1. Наличие квалифицированного персонала увеличивает конкурентоспособность.</p> <p>2. БДСУ является надежной, отвечает требованиям ТЗ государственной сертификации.</p>	<p>1. У потенциальных потребителей отсутствуют квалифицированные кадры для работы с новым продуктом.</p> <p>2. За счет высокой стоимости ПО понижается конкуренция.</p> <p>3. За счет специфичности разработки, недостаточности финансирования и большого объема необходимых государственных сертификатов разработка имеет большой срок выхода на рынок.</p>
---	---	--

6.4. Структура работ в рамках научного исследования

В рамках выполнения работ формируется рабочая группа, которая состоит из руководителя и студента, а также ряд работ. Для каждого этапа работы назначается исполнитель (таблица 10).

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность руководителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, студент
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Проведение патентных исследований	Студент
	4	Описание объекта автоматизации	Студент
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
	7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Студент
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Студент
	9	Корректировка модели, расчетов	Руководитель, студент

	10	Утверждение модели и теоретических обоснований	Руководитель
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	12	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Студент
	13	Технико-экономические расчеты	Студент
	14	Вопросы безопасности и экологии	Студент
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент

6.5. Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения трудоемкости работ используем такие показатели, как ожидаемое значение трудоемкости, продолжительности каждого этапа работы, продолжительности выполнения i -й работы в календарных днях и коэффициент календарности.

Для расчета ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ применяется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} \quad (6.1)$$

где t_{min} – минимальная трудоемкость i -й работы, чел/дн;

t_{max} – максимальная трудоемкость i -й работы, чел/дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждого этапа работы в рабочих днях T_{pi} :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (6.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел-дн;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну работу на данном этапе, чел.

Для построения диаграммы Ганта необходимо перевести длительность выполнения каждого из этапов работ в календарные дни:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (6.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы, кал.дн;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы, раб.дн;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется следующим образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 119} = 1,48 \quad (6.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Расчеты по трудоемкости выполнения работ представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работы						Длительность работ, раб.дн., T_{pi}		Длительность работ, кал.дн., T_{ki}	
	t_{min} , чел-дн		t_{max} , чел-дн		$t_{ож}$, чел-дн					
	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент
Составление и утверждение технического задания	3	3	7	7	5	5	3	3	5	5
Подбор и изучение материалов по теме		7		9		8		8		12
Проведение патентных исследований		3		5		4		4		6
Описание объекта автоматизации		3		5		4		4		6
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		6	
Проведение теоретических расчетов и обоснований		7		10		9		9		14
Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов		7		9		8		8		12
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями		4		6		5		5		8
Корректировка модели, расчетов	2	2	4	4	3	3	2	2	3	3

6.8. Дополнительная заработная плата исполнительской системы

Дополнительная заработная плата включает заработную плату за не отработанное рабочее время, но гарантированную действующим законодательством.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (6.8)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (примем равным 0,12).

Результаты расчетов дополнительной заработной платы:

$$Z_{\text{допР}} = 0,12 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 16\,183,5 = 1\,942,02 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{допС}} = 0,12 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 9\,814,6 = 1\,177,75 \text{ руб.}$$

6.9. 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:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (6.9)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ, установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, в 2016 году вводится пониженная ставка – 27,1%.

Результаты расчетов отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внебР}} = 0,271 \cdot (16\,183,5 + 1\,942,02) = 4\,912,02 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{внебС}} = 0,271 \cdot (9\,814,6 + 1\,177,75) = 2\,978,93 \text{ руб.}$$

6.10. Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \quad (6.10)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов берем в размере 16%:

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (25998,1 + 3119,77 + 7890,95) = 5921,41 \text{ руб.}$$

6.11. Формирование бюджета затрат научно-исследовательской работы

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы 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 приведен в таблице 15.

Таблица 15 – расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
	Руководитель	Студент	
1. Материальные затраты НТИ	0	0	
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	0	0	-
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	16 183,5	9 814,6	Пункт 7
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	1 942,02	1 177,75	Пункт 8
5. Отчисления во внебюджетные фонды	4 912,02	2 978,93	Пункт 9
6. Затраты на научные и производственные командировки	0	0	-
7. Накладные расходы	3 686,01	2 235,40	Пункт 10

8. Бюджет затрат НТИ	26 723,55	16 206,68	Сумма ст. 1-7
Итого			42 930,23 руб.

6.12. Определение ресурсоэффективности проекта

Интегральный показатель финансовой эффективности для любой системы управления является одинаковым, поэтому перейдем к определению ресурсоэффективности проекта.

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (6.11)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценки.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности проводим в виде табличной формы (таблица 16).

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов проектов

Критерии	Весовой коэффициент	Электропривод постоянного тока	Асинхронный электропривод	Синхронный электропривод
Безопасность	0,25	5	5	5
Удобство эксплуатации	0,10	5	5	5
Помехоустойчивость	0,10	4	4	5
Энергосбережение	0,15	4	4	5
Надежность	0,25	5	5	5
Материалоемкость	0,15	4	4	4
Итого:	1,00	4,6	4,6	4,85

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,85$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение, что говорит об эффективности использования данного технического проекта.

Переход к приводам на базе СДПМ целесообразен в момент реструктуризации производства, а также в тех производственных процессах, где применение других представленных схем нецелесообразно.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования и области его применения	<p>«Бездатчиковая система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами».</p> <p>Данная система состоит из датчиков тока и напряжения, драйвера и микроконтроллера.</p> <p>Эксплуатация системы производится в производственном отапливаемом и вентилируемом помещении.</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

4. Производственная безопасность	<p>Анализ выявленных вредных и опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p> <p>Опасности и вредные факторы аппаратной части системы - поражение электрическим током и возможность воспламенения приборов.</p> <p>Опасности и вредные факторы программной части системы - повышенный уровень излучений, интеллектуальное перенапряжение и нагрузка на зрительные органы.</p> <p>Положительные факторы внедрения системы</p>
5. Экологическая безопасность	Уменьшение количества твердых отходов, подлежащих утилизации.
6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Наиболее вероятной ЧС при эксплуатации БДСУ СДПМ является пожар на рабочем месте.
7. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Требования и мероприятия к организации рабочего места и рабочего времени.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.03.2017 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. МЕН	Невский Егор Сергеевич	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е31	Рыбак Анна Дмитриевна		

7. Определение ресурсоэффективности проекта

Во время работы с БДСУ СДПМ на работника (специалиста) может воздействовать ряд производственных факторов. БДСУ представляет собой микроконтроллер, драйвер, датчики тока и напряжения, которые входят в состав привода с СДПМ.

Возможность безопасного исполнения работниками своих трудовых обязанностей является важным условием современного эффективного производства, данный раздел посвящен поиску факторов окружающей среды, отрицательно влияющих на здоровье человека, а также технологических опасностей, появляющихся в результате работы разработанной системы и путей ослабления, либо исключения этих опасностей.

Предполагается, что данная система будет использоваться в производственном помещении, которое отапливается и вентилируется.

7.1. Производственная безопасность

В данной части работы рассматриваются опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть во время эксплуатации БДСУ СДПМ. Перечисленные факторы приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Вредные и опасные факторы при разработке и выполнении работ с БДСУ

Наименование работ (источник фактора)	Факторы (ГОСТ 12.0.003 - 74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Работа с БДСУ СДПМ. 2. Техническое обслуживание БДСУ СДПМ	1. Повышенный уровень шума во время работы привода. 2. Повышенный уровень вибрации во время работы привода. 3. Микроклимат помещения, где эксплуатируется БДСУ. 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений;	1. Электробезопасность (электрический ток, проходящий через БДСУ; незащищенные электрические провода, соединяющие части системы).	1. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [15]; 2. СНиП П-12-77 [16]; 3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 [17]; 4. СанПиН 2.2.4.548-96 [18]; 5. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [19]; 6. ГОСТ Р

	интеллектуальная перегрузка; повышенная нагрузка на зрительные органы при работе оператора.		50571.3-94 [20]; 7. ГОСТ Р 12.1.019-2009 [21].
--	---	--	--

7.2. Опасные и вредные факторы аппаратной части системы

Аппаратная часть представлена совокупностью датчиков тока и напряжения, драйвера и микроконтроллера.

Данные устройства основаны на полупроводниковых компонентах и характеризуются двумя отрицательными факторами – повышенным уровнем электромагнитного излучения и опасностями, связанными с наличием электрического тока.

Во время эксплуатации контакт работников с БДСУ СДПМ минимален, поэтому воздействие электромагнитного излучения можно считать несущественным.

Воздействие электрического тока представляет собой более реальную опасность, может выражаться такими эффектами как поражение электрическим током, а также воспламенение электронных устройств из-за воздействия внешних условий – попадания влаги или, что может привести к короткому замыканию.

Поражение электрическим током может привести к ожогам, судорогам, повреждению нервной системы, а также смерти. Возникновение пожара может привести к последствиям, описанным в ГОСТ 12.1.033.

Во избежание смерти и других негативных эффектов необходимо соблюдать правил пожарной и электрической безопасности. Подготовка к возникновению данных ситуаций должна производиться до начала работы на объекте.

Эксплуатация БДСУ СДПМ основана на работе с двигателями, которые в свою очередь являются источниками повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды. Для уменьшения влияния данного фактора применяются технологические и конструктивные меры, такие как:

замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Однако такие меры слишком затратные и трудоемкие. Другими решениями проблемы являются: использование звукопоглощающих материалов ограждения и отдельных частей установки, в нашем случае защитного кожуха. Также возможно закрытие звукоизолирующими кожухами всей установки. Последнее мероприятие является эффективным, но может плохо сказаться на всем технологическом процессе, так как необходим постоянный и легкий способ контакта с установкой.

Еще одним вредным фактором может являться повышенный уровень вибрации, который возникает при некорректной работе БДСУ и превышении номинальных нагрузок на валу СДПМ. Для устранения влияния вибраций на организм человека необходимо осуществлять жесткую фиксацию рабочих механизмов на своих местах и использовать виброгасящие материалы.

Большое внимание необходимо уделять параметрам окружающей среды рабочей зоны. От температуры, давления и влажности зависит электробезопасность помещения. Кроме того, производственный микроклимат в помещении существенно сказывается на качестве работы и производительности труда, а также на здоровье работников.

Микроклимат рабочего места, оборудованного центральным отоплением и автоматической системой кондиционирования:

- Температура летом 22-24°C, зимой 20-22°C.
- Влажность 40%.
- Скорость движения воздуха 0,1 м/с.

Микроклимат рабочей зоны полностью соответствует нормам СанПиН 2.2.4.548-96, нормы представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
-------------	-----------------	----------------------------	--------------------------------

	Оптимальная	Допустимая на рабочих местах				Оптимальная	Допустимая	Оптимальная, не более	Допустимая, не более
		Верхняя		Нижняя					
		Пост.	Не пост.	Пост.	Не пост.				
Холодный	22 – 24	25	26	21	18	40 – 60	75	0,1	0,1
Теплый	23 - 25	28	30	22	20	40 - 60	70	0,1	0,1

В помещении, где будет производиться работа, температура и влажность воздуха должны поддерживаться в соответствии с таблицей 2 путем использования системы кондиционирования, которая будет очищать, нагревать (охлаждать) поступающий воздух.

7.3. Опасные и вредные факторы программной части системы

Программная часть БДСУ с точки зрения охраны труда и социальной ответственности представляет собой интерфейс взаимодействия с оператором, с помощью которого оператор может отслеживать корректность работы СДПМ, вносить свои коррективы и узнавать об ошибках.

Работа оператора с компьютером попадает под ГОСТ 12.2.032. и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы".

В данном случае к негативным факторам относятся повышенные излучения, увеличенная нагрузка на зрительные органы, а также интеллектуальное перенапряжение.

Для уменьшения влияния вредных факторов применяются следующие методы:

- освещение рабочего места искусственными источниками света для создания комфортных значений освещенности в пределах 300-500 лк;
- окраска корпуса компьютера в светлые цвета, рассеивающие свет;
- прохождение обязательных медосмотров для допуска к работе;
- введение нормативных документов с указанием режима работы и отдыха, соответствующее группе А при трудовой деятельности за компьютером;
- оборудование рабочего места оператора удобной мебелью и организация достаточного объема пространства не менее.

7.4. Положительные факторы внедрения системы

БДСУ СДПМ помимо негативных факторов характеризуется и положительными факторами из-за отсутствия ДПР.

Данная система может использоваться в приводах вместо системы управления двигателем с использованием ДПР, а также в приводах, где установка ДПР физически невозможна, что увеличивает область применения БДСУ. Невозможность установки ДПР в некоторых приводах обусловлено необходимостью наличия проводной связи данного узла с преобразователем, управляющим работой СДПМ.

7.5. Экологическая безопасность

При работе различных устройств всегда есть вероятность загрязнения окружающей среды. Все приборы могут влиять на атмосферу, гидросферу и литосферу.

В отличие от обычной системы управления в БДСУ отсутствует ДПР. Из этого следует уменьшение количества твердых отходов.

Утилизацию ДПР следует производить в соответствии с законодательством РФ. Под него попадают физические лица и организации. Необходимость в специальной утилизации возникает в связи с тем, что внутри ДПР присутствуют драгоценные металлы, а также магниты. При неправильной утилизации происходит повреждение экологии и окружающей среды.

При утилизации ДПР производится разделение на фракции:

- фотоэлементы;
- металлы;
- пластмассы;
- провода;
- катушки индуктивности;
- магниты.

7.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при эксплуатации системы является пожар на рабочем месте. При неправильном функционировании

системы на обмотках двигателя могут возникнуть высокие токи, что приводит к их воспламенению.

В качестве противопожарных мероприятий должны быть применены следующие меры:

- в помещении должны находиться средства тушения пожара, средства связи; электрическая проводка электрооборудования и осветительных приборов должна быть исправна;
- все сотрудники должны знать место нахождения средств пожаротушения и уметь ими воспользоваться, средств связи и номера экстренных служб.

В связи с возможностью возникновения пожара разработан следующий план действий:

- в случае возникновения пожара сообщить о нем руководителю, постараться устранить очаг возгорания имеющимися силами при помощи первичных средств пожаротушения (огнетушитель порошковый, углекислотный О-1П0 (з)-АВСЕ);
- привести в действие ручной пожарный извещатель, если очаг возгорания потушить не удастся;
- сообщить о возгорании в службу пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить адрес, место и причину возникновения пожара;
- принять меры по эвакуации людей и материальных ценностей;
- встретить пожарную охрану, при необходимости сообщить всю необходимую информацию и оказать помощь при выборе наилучшего подхода к очагу возгорания.

7.7. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Требования к организации рабочих мест предъявляются следующее. Рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований согласно ГОСТ 12.2.033-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» и ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».

В соответствии с государственными стандартами и правовыми нормами обеспечения безопасности предусмотрена рациональная организация труда в течение смены, которая предусматривает:

- длительность рабочей смены не более 8 часов;
- установление двух регламентируемых перерывов (не менее 20 минут после 1-2 часов работы, не менее 30 минут после 2 часов работы);
- обеденный перерыв не менее 40 минут.

Все вредные и опасные производственные факторы рассмотрены в соответствии с нормативными документами:

- СН 2.2.4/2.1.8.562-96;
- СНиП П-12-77
- СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96;
- СанПиН 2.2.4.548-96;
- СН 2.2.4/2.1.8.566-96;
- ГОСТ Р 50571.3-94;
- ГОСТ Р 12.1.019-2009.

Заключение

На данный момент для проекта была разработана структурная схема, электрическая принципиальная, составлена математическая модель устройства. Для более точных расчетов в реальном времени управлением двигателя были выбраны микроконтроллер STM8S207S8T6C и драйвер FSB50450. В настоящее время разрабатывается алгоритм управления СДПМ.

Положение ротора может быть определено с помощью уравнения (4.44). Необходимо знать напряжение на электродвигателе, ток, сопротивление на статоре и индуктивность по оси q . Индуктивность по оси q может измениться из-за насыщения, поэтому важно знать индуктивность в реальном времени.

Список публикаций студента

1. Рыбак А. Д. Энергоэффективность и окупаемость синхронных двигателей с постоянными магнитами / А. Д. Рыбак, А. Ю. Зарницын, К. С. Власов; науч. рук. С. В. Леонов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — [С. 325-326].
2. Рыбак А. Д. Синхронный двигатель с постоянными магнитами / А. Д. Рыбак, А. Ю. Зарницын, Д. Ф. Федоров // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 19-21 октября 2016 г., г. Северск. — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. — [С. 169].
3. Рыбак А.Д. Энергоэффективность и окупаемость синхронных двигателей с постоянными магнитами / А. Д. Рыбак, Д.Ф. Федоров, К. С. Власов; науч. рук. С. В. Леонов // Когнитивная робототехника: материалы международной конференции, 7–10 декабря 2016 г. / под ред. В.И. Сырямкина, А.В. Юрченко; Томский государственный университет – [С. 275-282]/

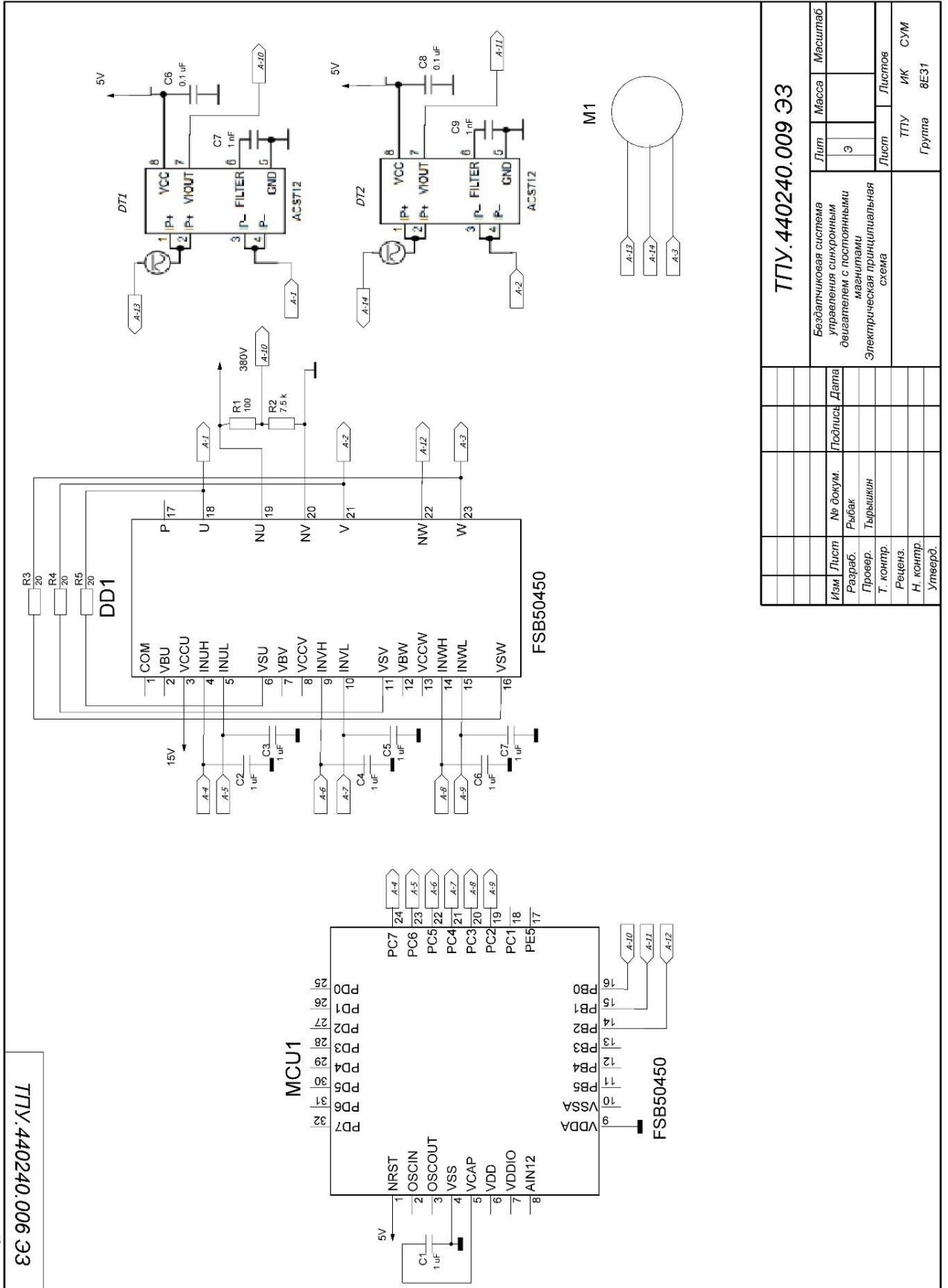
Список используемой литературы

1. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учеб. для студ. вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
2. Cristian Busca. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application.- Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet, 2010
3. Карлов Б., Есин Е. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация. Силовая электроника 2004 №1
4. Initial Rotor Angle Detection of a Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine / P.B. Schmidt, M.L. Gasperi, G. Ray, A.H. Wijenayake // Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Conference Record of the 1997 IEEE, Vol. 1, pp. 459-463
5. Способ и устройство для определения углового положения ротора многофазного электродвигателя с постоянными магнитами: пат. 2262181 Рос. Федерация: МПК H02 P 6/18 / Вуаля Жан-Пьер; заявитель и патентообладатель С.А. Бьен-Эр заявл. 12.12.2000; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28
6. Initial Rotor Position Detection in PMSM based on Low Frequency Harmonic Current Injection / D. Basic, F. Malrait, P. Rouchon // European Power Electronics, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE/PEMC, Ohrid, Sep. 2010, Vol. 4, pp. 916-922
7. Способ бездатчикового определения начального положения ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: пат. 2594358 Рос. Федерация: МПК H02 P 6/16 H02 P 6/18 / В.Н. Волокитин, Е.М. Васильев; заявитель и патентообладатель ЗАО «Орбита» заявл. 27.05.2015; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23
8. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока: Учебное пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» - Иваново, 2008 г. - с. 191

9. Козярук А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков, /Под ред. А.Г. Народицкого. - СПб.: Санкт-Петербургская Электротехническая компания, 2004.
10. Способ векторного управления скоростью вращения трехфазной машины: пат. 2557071 Рос. Федерация: МПК H02 P 21/00 H02 P 21/12 H02 P 27/08 / О.А. Захаржевский, В.В. Афонин; заявитель и патентообладатель ФГБ ОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» заявл. 25.02.2013; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20
11. SUBSCRIBE.RU [Электронный ресурс] Электротехническая энциклопедия №98. Синхронные электродвигатели вчера и сегодня. URL: <http://subscribe.ru/archive/tech.electrotech/200901/19012756.html/> (дата обращения: 27.10.2016)
12. Леонов С.В., Жиганов А.Н., Кербель Б.М., Фёдоров Д.Ф., Макасеев Ю.Н., Кремлёв И.А. Анализ влияния геометрии постоянных магнитов на энергоэффективность электромеханических систем // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 2. С. 126-130.
13. Калачев И.Ю. Векторное регулирование (Заметки практика) - 2013, 78 с.
14. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-ое изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1974.
15. СН 2.2.4/2.1.8.562-962. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
16. СНиП П-12-77. Защита от шума.
17. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.
18. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

19. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы.
20. ГОСТ Р 50571.3-94. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током.
21. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатуры защит.

Приложение А. Электрическая принципиальная схема



ТПУ.440240.006 ЭЗ

153

Изм		Лист	№ док-м.	Подпись	Дата
			Рыбак		
			Гыршыкин		
			Т. контр.		
			Реценз.		
			Н. контр.		
			Утвержд.		

Лит		Масса	Масштаб
Э	3		

Лист		Листов
ТПУ	ИК	СУМ
Группа	8Е31	

ТПУ.440240.009 ЭЗ	
Беззаточниковая система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами	
Электрическая принципиальная схема	