

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

Институт социально-гуманитарных технологий
Направление подготовки 27.03.04 Управление в технических системах
Кафедра Автоматики и Компьютерных Систем

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Информационное моделирование и разработка системы управления серводвигателем БПЛА	

УДК 621.313.2:004.31

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158А30	Ван Ши		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Яковлева Е.М.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преп. каф. МЕН	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Штейнле А.В.	к.м.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.О. зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС	Суходоев М.С.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами.
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре

Универсальные компетенции

P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



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

Институт социально-гуманитарных технологий
Направление подготовки 27.03.04 Управление в технических системах
Кафедра Автоматики и Компьютерных Систем

УТВЕРЖДАЮ:
И.о. зав. кафедрой
_____ Суходоев М.С.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
158A30	Ван Шии

Тема работы:

Информационное моделирование и разработка системы управления серводвигателем БПЛА

Утверждена приказом директора (дата, номер)

09.03.2017, № 786/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

02.06.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

1. Гексакоптер 700AL-X6;
2. Бесколлекторный двигатель постоянного тока;
3. Электронный микроконтроллер скорости;
4. Пакет прикладных программ MATLAB/SIMULINK.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Изучить состав и принципы работы комплекта БПЛА 700AL-X6; 2. Собрать физическую установку БПЛА 700AL-X6; 3. Изучить принцип запуска двигателя БПЛА 700AL-X6; 4. Создать модель двигателя в пакете MATLAB/SIMULINK; 5. Определить показатели качества двигателя.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация в формате *.pptx на 15 слайдах

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Н.Г.
Социальная ответственность	Штейнле А.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.2017
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Яковлева Елена Максимовна	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158A30	Ван Шии		

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

Институт социально-гуманитарных технологий
 Направление 27.03.04 Управление в технических системах
 Кафедра автоматики и компьютерных систем
 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:	02.06.2017 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.2017	Основная часть	75
15.05.2017	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
22.05.2017	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АИКС	Яковлева Е.М.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

И.о. зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС	Суходоев М.С.	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
158A30	Ван Шии

Институт	ИСТГ	Кафедра	АиКС
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	27.03.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Должностной оклад научного руководителя – 26300 руб. Должностной оклад инженера – 17000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизации – 20%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Социальные отчисления – 30% от ФЗП
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и их временная оценка
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проект
	Смета затрат на оборудование
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Анализ полученных результатов
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
График Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	06.02.2017
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преп. каф. МЕН	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158A30	Ван Шии		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
158A30	Ван Ши

Институт	ИСТГ	Кафедра	АиКС
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	27.03.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: – вредных проявлений факторов производственной среды (метеословия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)	1. Вредные факторы: микроклимат; шум; электромагнитные поля; освещение 2. Опасные факторы: опасность возникновения пожара; опасность поражения электрическим током 3. Негативное воздействие на окружающую среду: утилизация списанной техники и комплектующих; утилизация люминесцентных ламп 4. Чрезвычайные ситуации: пожар вследствие неполадок в электропроводке;
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	Данный раздел основан на следующих документах: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, СНиП 21-01-97, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, ГОСТ 17.2.1. 03-84, ГОСТ 17.4.3.04-85, СНиП 23-05-95, ГОСТ 12.1.019-79, ГОСТ 30775-2001, ГОСТ 17677-82.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)	Разработка программного приложения ведётся в помещении с уровнем освещённости в пределах нормы, согласно СНиП 23-05-95. Уровень шума в помещении в пределах нормы, согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Микроклимат в помещении удовлетворяет нормам (СанПиН 2.2.4.548-96)
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	Основными источниками опасности являются электроприборы, которые могут вызвать как поражение электрическим током, так и пожары. Для обеспечения безопасности необходимо проводить организационные и технические мероприятия, для предотвращения таких ситуаций. Необходимо следовать технике безопасности, обращаясь с электрическими приборами (согласно ГОСТ 12.1.019-79).

3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	Вышедшие из строя комплектующие компьютеров и электроприборов, а также люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с ГОСТ 12.2.007.13-88.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Разработан план эвакуации при ЧС, в помещении имеется план эвакуации, а так же имеются 2 огнетушителя ОУ-2.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	06.02.2017
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158А30	Ван Шии		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 77 страниц, 43 рисунка, 13 таблиц, 29 источников.

Ключевые слова: БПЛА, бесколлекторный двигатель постоянного тока, электронный микроконтроллер скорости, моделирование, MATLAB/SIMULINK.

Объектом исследования является моделирование бесколлекторного двигателя постоянного тока.

Цель работы – создать информационное моделирование системы управления двигателем БПЛА.

В ходе исследования был изучен состав, принципы работы двигателя и электронного микроконтроллера скорости БПЛА 700AL-X6. Создана на основании дифференциальных уравнений модель двигателя в MATLAB/SIMULINK. Получены передаточные функции двигателя по напряжению и по возмущающему фактору, определены показатели качества по переходному процессу, по частотным характеристикам. Оценена точность работы двигателя.

Предложена схема электропривода бесколлекторного двигателя постоянного тока, которая позволила получить серию графиков, объясняющих принцип действия системы.

Полученные наработки и результаты будут использованы в дальнейших исследованиях БПЛА в лаборатории научного студенческого творчества кафедры АиКС.

Экономическая эффективность и значимость работы, себестоимость исследуемой системы представлена в главе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Выявлены основные опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть в процессе работы. Разработанные меры по снижению воздействий системы на экологию представлены в главе социальная ответственность. Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013, формулы – в пакете MathType 6.9.

ABSTRACT

Graduation qualification work contains 77 pages, 43 drawings, 13 tables, 29 sources.

Keywords: UAV, brushless DC motor, electronic speed microcontroller, simulation, MATLAB / SIMULINK.

The object of the study is the simulation of a brushless DC motor.

The aim of the work is to create information modeling of the UAV motor control system.

In the course of the study, the composition, operating principles of the engine and electronic speed microcontroller UAV 700AL-X6 was studied. Based on the differential equations, the engine model in MATLAB / SIMULINK is created. The transfer functions of the motor are obtained for voltage and for the disturbing factor, the quality indices for the transient process are determined according to the frequency characteristics. The accuracy of the engine is estimated.

The scheme of an electric drive of a brushless DC direct current motor is proposed, which made it possible to obtain a series of graphs explaining the operation principle of the system.

The obtained results and results will be used in further research of UAV in the laboratory of scientific student creativity of the Department of AIC.

The economic efficiency and significance of the work, the cost of the system under study is presented in the chapter on financial management, resource efficiency and resource saving.

The main dangerous and harmful factors that may arise in the process of work are identified. The developed measures to reduce the environmental impacts of the system are presented in the chapter on social responsibility. Graduation qualification work was carried out in the text editor Microsoft Word 2013, the formulas - in the package MathType 6.9.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

БПЛА – беспилотный летательный аппарат, пилотируемый дистанционно, или выполняющий полёт автономно.

Микроконтроллер – микросхема, выполняющая различные функции.

БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока.

ЭДС – электродвижущая сила.

Электрический градус – единица фазы и разности фаз, используемая в электротехнике.

MOSFET – полупроводниковые приборы на основе МОП-транзисторов (металл-оксид-полупроводник).

МОП – это транзисторы (от слов «металл-оксид-полупроводник», англ. metal-oxide-semiconductor field effect transistor).

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
1 СОСТАВ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА	15
1.1 Состав БПЛА	15
1.2 Характеристики основных устройств	16
1.2.1 Бесколлекторный двигатель постоянного тока.....	16
1.2.2 Электронный микроконтроллер скорости (ESC).....	21
2 ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ.....	29
2.2 Моделирование запуска двигателя в MATLAB/SIMULINK.....	31
2.3 Моделирование бесколлекторного двигателя постоянного тока.....	32
2.3.1 Модель уравнений напряжений.....	32
2.3.2 Модель электродвижущей силы	32
2.3.3 Модель электромагнитного момента двигателя	34
2.3.4 Общая модель двигателя постоянного тока	35
2.4 Привод системы управления двигателя.....	36
2.4.1 Модель регулирования скорости	36
2.4.2 Модель тока сравнения.....	37
2.4.3 Модель контроля гистерезиса тока	38
2.4.4 Модель преобразователя напряжения.....	39
2.4.5 Общая схема электропривода бесколлекторного двигателя постоянного тока	40
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	42
3.1 Определение передаточных функций двигателя постоянного тока.....	42
3.2 Определение показателей качества процесса регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока	45
3.3 Исследование влияния нагрузки на работу двигателя постоянного тока..	47
3.4 Оценка точности процесса регулирования двигателя постоянного тока ..	49
3.5 Результат моделирования.....	51

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	55
4.1 Календарный план работ и оценка времени их выполнения	55
4.2 Смета затрат на проект	59
4.2.1 Материальные затраты.....	59
4.2.2 Амортизация компьютерной техники	59
4.2.3 Затраты на заработную плату.....	60
4.2.4 Затраты на социальные нужды.....	61
4.2.5 Прочие затраты	61
4.2.6 Накладные расходы	61
4.3 Смета затрат на материалы для реализации проекта	62
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	63
5.1 Техногенная безопасность	64
5.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды	64
5.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды	66
5.2 Региональная безопасность.....	68
5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности	69
5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений.....	71
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
CONCLUSION	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	75

ВВЕДЕНИЕ

В конце XIX века Никола Тесла продемонстрировал первый в мире радиоуправляемый летательный аппарат. Большой вклад в развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) внесла военная индустрия в годы Второй Мировой войны. И по значимости развития технологий в военной сфере БПЛА необходимо отметить США, Россию, Израиль и Великобританию. Гражданские БПЛА появились лишь в 2000 году, однако темпы развития весьма впечатляют. И во многих странах мира появилась необходимость законодательного регулирования производителей и потребителей. Современные мультикоптеры используют бесколлекторные электродвигатели и литий-полимерные аккумуляторы в качестве источника энергии. Бесколлекторный двигатель постоянного тока имеет достоинства: легкий вес, высокая эффективность, длительный срок службы.

Актуальность работы. Для того, чтобы легко проверить теоретический анализ и различные программы управления и алгоритм управления, необходима точная и надежная модель системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока. Поэтому, целью ВКР является: информационное моделирование и разработка системы управления двигателем БПЛА. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить состав и принципы работы комплекта БПЛА 700AL-X6;
2. Собрать физическую установку БПЛА 700AL-X6;
3. Изучить принцип запуска двигателя БПЛА 700AL-X6;
4. Создать модель управления двигателем в пакете MATLAB/SIMULINK;
5. Оценить показатели качества работы ДПТ.

1 СОСТАВ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Гексакоптер 700AL-X6 представляет собой одну из разновидностей мультикоптеров. Внешний вид гексакоптера имеет X-схему и представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Внешний вид 700AL-X6

1.1 Состав БПЛА

В состав комплекта БПЛА входят устройства, перечисленные в таблице

1.1

Таблица 1.1 – Состав БПЛА

Устройства	Марка	Количество
Бесколлекторный двигатель постоянного тока	SUNNYSKY	6
Электронный микроконтроллер скорости (ESC)	HOBBYWING SkyWalker	6
Полётный контроллер	DJI Naza Lite	1
Приёмник	WFR07S 2.4GHz	1
Аккумулятор	ACE	1
Ходовая часть	ATG-700AL-X6	1
Крыло	ATG	6
Пульт управления	WFLY	1
Arduino UNO	-	1
Ультразвуковой датчик расстояния	HC-SR04	1

1.2 Характеристики основных устройств

1.2.1 Бесколлекторный двигатель постоянного тока

Бесколлекторный двигатель постоянного тока (БДПТ) KV характеризуется количеством оборотов двигателя на один вольт без нагрузки на валу. Умножив этот показатель на максимальное напряжение, можно получить максимальное число оборотов двигателя без нагрузки на валу. Основные характеристики бесколлекторного двигателя постоянного тока сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики БДПТ [5]

Характеристики	X2216 KV880
Внешний диаметр статора	22 мм
Внутренний диаметр статора	16 мм
Количество обмоток	12
Количество полюсов ротора	14
Величина kv	880
Ток холостого хода	0.5А
Сопротивление мотора	0.117 ом
Максимальный непрерывный ток	20А/30S
Максимальная непрерывная мощность	320 ват
Вес	72 г
Диаметр якоря	27.7мм
Диаметр вала	3.175мм
Длина вала	34мм
Общая длина вала	36.5мм

Внешний вид бесколлекторного двигателя постоянного тока представлен на рис.1.2, а его внутренняя структура на рис. 1.3.



Рисунок 1.2. – Внешний вид двигателя



Рисунок 1.3 – Внутренняя структура двигателя

На рисунке 1.3 видно, что двигатель имеет 12 обмоток, уложенных в пазы статора, и 14 магнитных полюсов, расположенных на роторе. Количество обмоток двигателя и количество полюсов различно. Это предотвращает притяжение статора и магнита ротора. А также выравнивает его движение, поэтому двигатель может вращаться плавно без паузы.

Принцип действие двигателя

Принцип действие двигателя основан на преобразовании электрической энергии в механическую. Все 12 обмоток якоря двигателя разделены на 3 фазы: А, В и С. После подачи напряжения, вначале подключаются фазы А и В, рис.1.4.

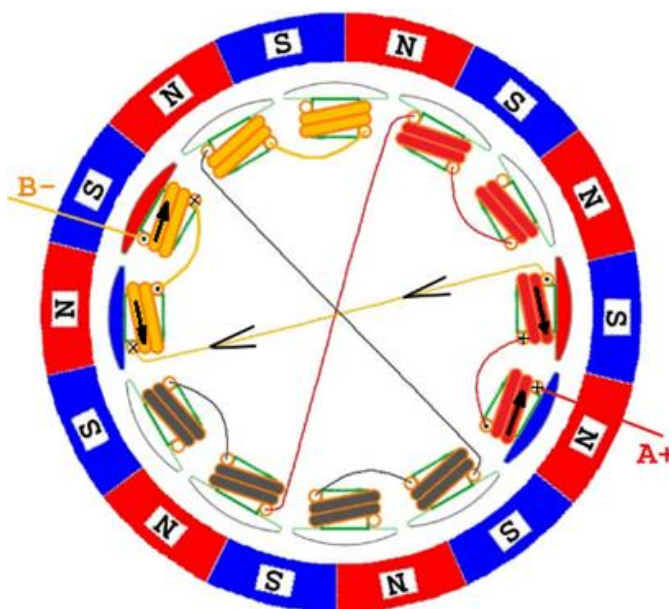


Рисунок 1.4 – Подключена фаза АВ

В результате этого, согласно закона Ленца: «Если по проводам одной части якоря пропустить ток движущийся «от нас» (отмечено крестиком), а в другой части — «на нас» (отмечено точкой), то согласно правилу «левой руки»

проводники первой части будут выталкиваться из магнитного поля статора влево, а проводники второй половины якоря по тому же принципу будут выталкиваться вправо». Поскольку медный провод уложен в пазы якоря, то, вся сила воздействия будет передаваться и на него, и он будет проворачиваться. Дальше видно, что когда проводник с направлением тока «от нас» провернётся и станет против южного полюса, создаваемого статором, то он будет выдавливаться в левую сторону, и произойдёт торможение. Чтобы этого не случилось нужно поменять направление тока в проводе на противоположное, как только будет пересечена нейтральная линия. Это делается с помощью коллектора – специального переключателя, коммутирующего обмотку якоря, который подключает следующие фазы А и С.

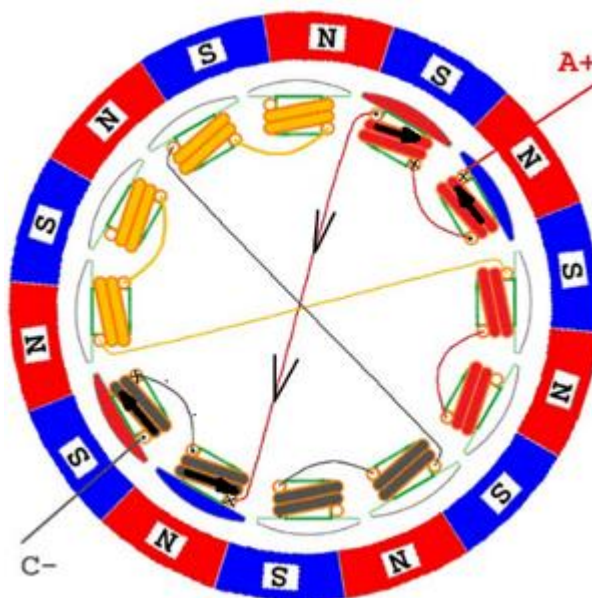


Рисунок 1.5 – Подключены фазы АС

Затем поочерёдно подключаются и остальные фазы: ВС-> ВА-> СА-> СВ и на рис. 1.6 показан алгоритм работы магнитной системы двигателя.

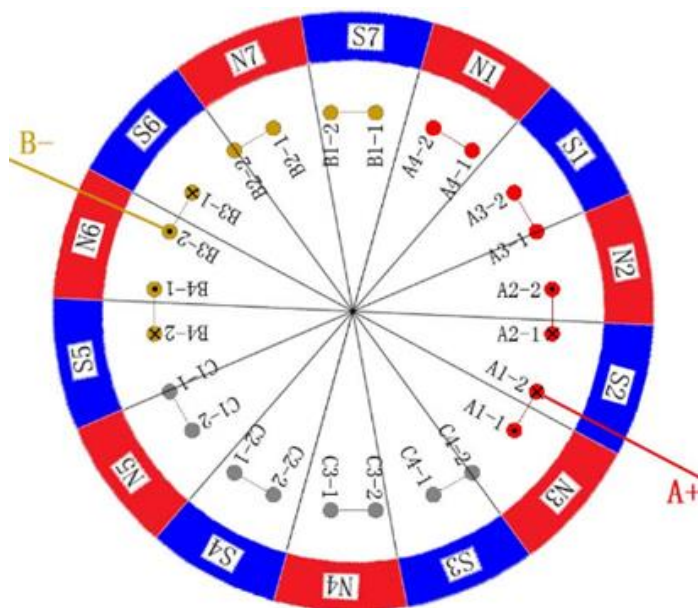


Рисунок 1.6 – Алгоритм работы магнитной системы двигателя

Для упрощения описания, каждая обмотка теперь стала одной точкой. Выполнена нумерация для всех магнитов и обмоток. Когда фаза АВ находится под напряжением, то A1-1 находится под воздействием магнитного полюса N. По правилу левой руки A1-1 подвергается действию силы по часовой стрелке, то есть и ротор подвергается действию силы по против часовой стрелке, в то же время, A1-2 находится в магнитном полюсе S, но ток направлен противоположно A1-1, поэтому ротор подвергается действию силы также против часовой стрелки. Для любой комбинации индексов фаз А, В, С ротор подвергается действию силы против часовой стрелки.

Так как количество пар полюсов у ротора 7, то угол вращения ротора равен: $360/7=51.43$ градусов, а так как количество пар обмоток 6, то за одну фазу угол поворота ротора изменится: $51.43/6=8.57$ градусов. Поэтому, после вращения ротора на каждые 8.57 градусов, нужно изменять фазу, соблюдая порядок их следования: АВ-> АС-> ВС-> ВА-> СА-> СВ.

Один полный цикл равен 360 электрическим градусам. Один цикл во вращающейся электрической машине осуществляется, когда вращающееся поле перемещается от одного полюса к следующему полюсу одной полярности. В машине с более чем двумя полюсами, число электрических градусов на оборот получается путём умножения количества пар полюсов на 360. Таким образом,

на рисунке, от полюса S2 до полюса S3, ротор поворачивается на 360° с интервалом коммутации, равным 60° .

Электродвижущая сила и ток двигателя

Рисунок 1.7 показывает распределение магнитной индукции полюсов. Определим направление намагниченности положительное, когда 0° распределительная в обратном направлении, то магнитная индукция равна нулю, потом начинает линейно возрастать, максимум в точке А, а затем остается постоянной величиной неизменной, до точки В начинает снижаться, до 180° равно нулю. Затем начинают отрицательный рост, достигнуто максимальное отрицательное значение в точке С, тогда остается постоянной отрицательной неизменной, до тех пор пока точка D начинает ослабевать, до 0° вернется обратно к нулю. По правилу правой руки, формула $E=BLV$, при равномерном вращении, в обмотках возникает электродвижущая сила трапецевидной формы.



Рисунок 1.7 – Распределение магнитного поля

График зависимости между электродвижущими силами фаз и индуцированными токами представлены на рис. 1.8

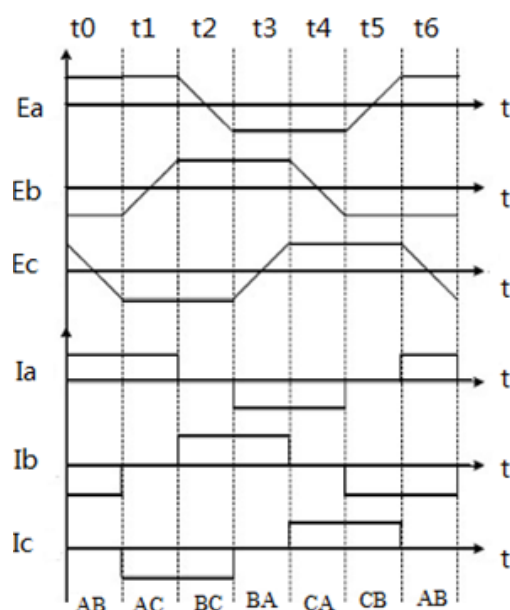


Рисунок 1.8 – График тока и электродвижущей силы

Управление бесколлекторным двигателем в большинстве случаев осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции. Единственный важный момент, о котором нельзя забывать при использовании подобного двигателя - это необходимость использовать электронный контроллер скорости (ESC), т.к. напрямую от источника постоянного тока такой двигатель работать не сможет.

1.2.2 Электронный микроконтроллер скорости (ESC)

Характеристики электронного контроллера скорости приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Характеристики электронного контроллера скорости [7]

Тип	SkyWalker – 40A
Выходной ток	40A (в пиках до 55A в течение 10 сек)
Входное напряжение	2-4S Lipo или 5 - 12 ячеек NiMH
Вид ВЕС (Battery eliminator circuit)	Линейный регулятор
Выход ВЕС (импульсный)	5В/3А
Частота обновления	50 - 432 Гц
Максимальная скорость	70000 об/мин для 6 полюсных бесщёточных двигателей,
Вес	39 г
Размер	68*25*8 мм

Функция электронного контроллера скорости

- функция безопасного старта: в зависимости от положения ручки газа мотор не будет вращаться после подключения питания
- функция калибровки газа: минимальные и максимальные положения
- функция пользовательского программирования - с помощью пульта или карты программирования
- совместим с Lipo и NiMH батареями
- тайминг устройство задержки для работы с разными бесколлекторными моторами
- защита от короткого замыкания, перегрева, потери сигнала газа.

Battery Creation Battery Eliminator Circuits - это небольшие устройства, которые устраняют необходимость в приемнике и серво-аккумуляторной батарее. Они потребляют более высокое напряжение от аккумуляторных батарей и понижают его до уровня напряжения, который подходит для вашего приемника и сервопривода. Это требуется в приложениях, которые потребляют большую мощность для нескольких сервоприводов или используют более 3S моторные пакеты, так как большинство ESC с линейными BEC не предназначены для этих применений.

Внешний вид электронного микроконтроллера скорости представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Внешний вид микроконтроллера ESC

Прежде чем мы перейдем непосредственно к микроконтроллеру, полезно будет посмотреть, как устроен двигатель с точки зрения электротехники. Типичный бесколлекторный мотор имеет три обмотки (фазы), будем называть их А, В, С. Фазы соединены методом "звезда", см. рис. 1.10.

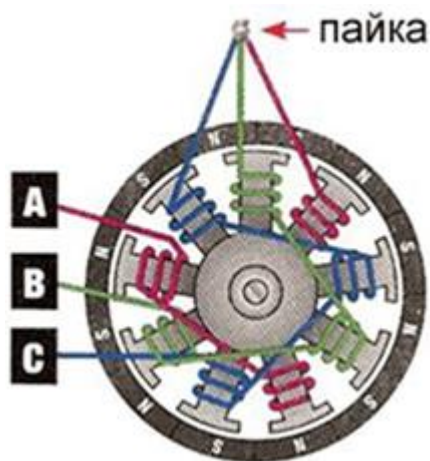


Рисунок 1.10 – Соединение фаз бесколлекторного ДПТ

На рисунке 1.10 проводники образуют фазы. Важно понимать, что все что мы делаем с фазами А и В, оказывает влияние на фазу С. В отсутствие каких-либо внешних сил (например, переменного магнитного поля), фазы это просто замкнутые куски провода, именно такими они являются для микроконтроллера во время запуска двигателя (мотора).

Работа микроконтроллера заключается в том, чтобы передать энергию постоянного тока от аккумулятора к трехфазному бесколлекторному двигателю. Для передачи энергии микроконтроллеру использует MOSFET'ы (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник) - силовые ключи, которые могут открываться и закрываться за долю секунды. Упрощённая схема подключения микроконтроллера к двигателю приведена на рис.1.11.

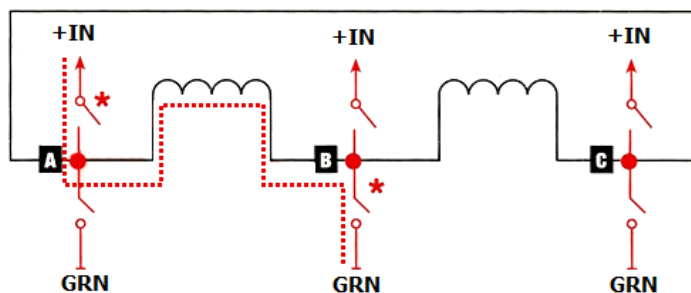


Рисунок 1.11 – Схема подключения микроконтроллера к двигателю

Из рисунка 1.11 показано, что, закрывая ключи А и В, которые отмечены красной звездочкой, ток пускается от точки +In через фазы А и В на землю. Ток, протекающий через фазы, создает магнитное поле, которое притягивает или отталкивает магниты ротора и, таким образом, вызывает вращение.

Чтобы вызвать проворот мотора, можно подключить любые две фазы мотора напрямую к аккумулятору. Еще одна из основных задач контроллера - ограничить ток, протекающий через фазу при коммутации. Фокус поддержания вращения в том, чтобы открыть два нужных ключа в нужный момент времени и тут же закрыть ключи, пока ситуация не вышла из-под контроля. Пока ток протекает по обмотке, магнит ротора притягивается к обмотке (полюс S к N или N к S), тянет за собой ротор и поворачивает его. Как только магнит проходит обмотку, мы открываем другие ключи так, чтобы теперь отталкивать магнит ротора (N от N или S от S) и проталкивать магнит по направлению вращения дальше от этой обмотки. Повторяя эту идею для всех трех обмоток, и станет ясно, как заставить ротор с магнитами продолжать вращаться. Как только вращение началось, нам остается только переключать обмотки снова и снова, чтобы поддерживать этот процесс. На рис. 1.12 приведена фотография типичного микроконтроллера.



Рисунок 1.12 – Внутренняя структура микроконтроллера

На рисунке 1.12 видны шесть полевых транзисторов MOSFET, которые используются для включения и выключения фаз. Еще видны провод подключения к приемнику и большой конденсатор, который служит накопителем энергии для контроллера. Мелкие детали — это различные фильтры, которые нужны для правильной работы контроллера. Мощная пайка контактов обеспечивает протекание больших токов. На следующем рис. 1.13 показано нанесение поверх фотографии рис. 1.11 изображение ключей.

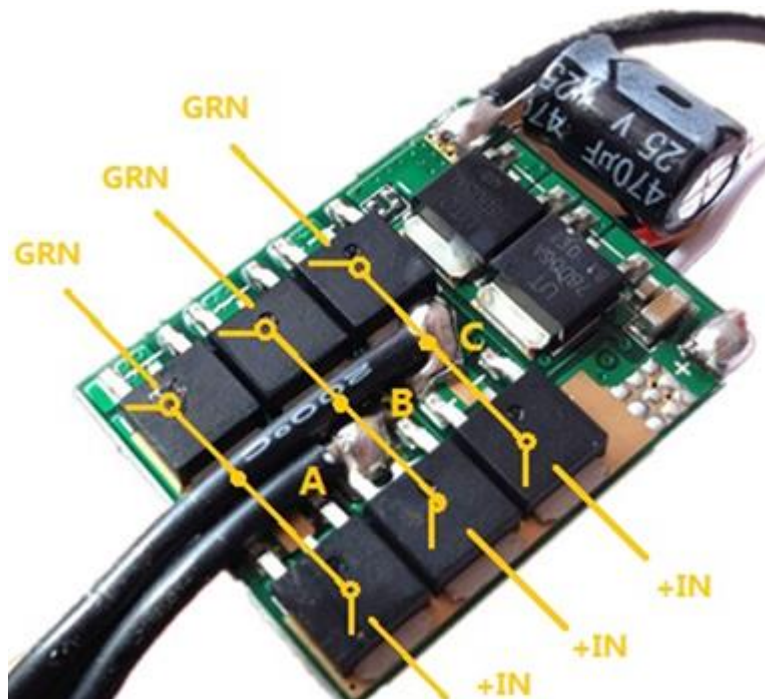


Рисунок 1.13 – Нанесение ключей на фотографию контроллера

Рассмотрим работу всего контроллера по функциональной диаграмме, представленной на рис. 1.14. В контроллере выделяются четыре основных блока:

1. силовые ключи MOSFET,
2. цепь управления ключами,
3. микропроцессор,
4. цепь определения положения ротора.

Схема показывает, как эти части соединены между собой. Теперь у нас есть представление о том, как работает силовая часть электронного микроконтроллера скорости: MOSFET'ы работают как ключи, открываясь и закрываясь, они вызывают протекание тока через обмотки мотора. Иногда

мощности одного ключа недостаточно, для мощных регуляторов используются несколько ключей включенных параллельно. Нагрев регулятора практически полностью вызван внутренним сопротивлением ключей.

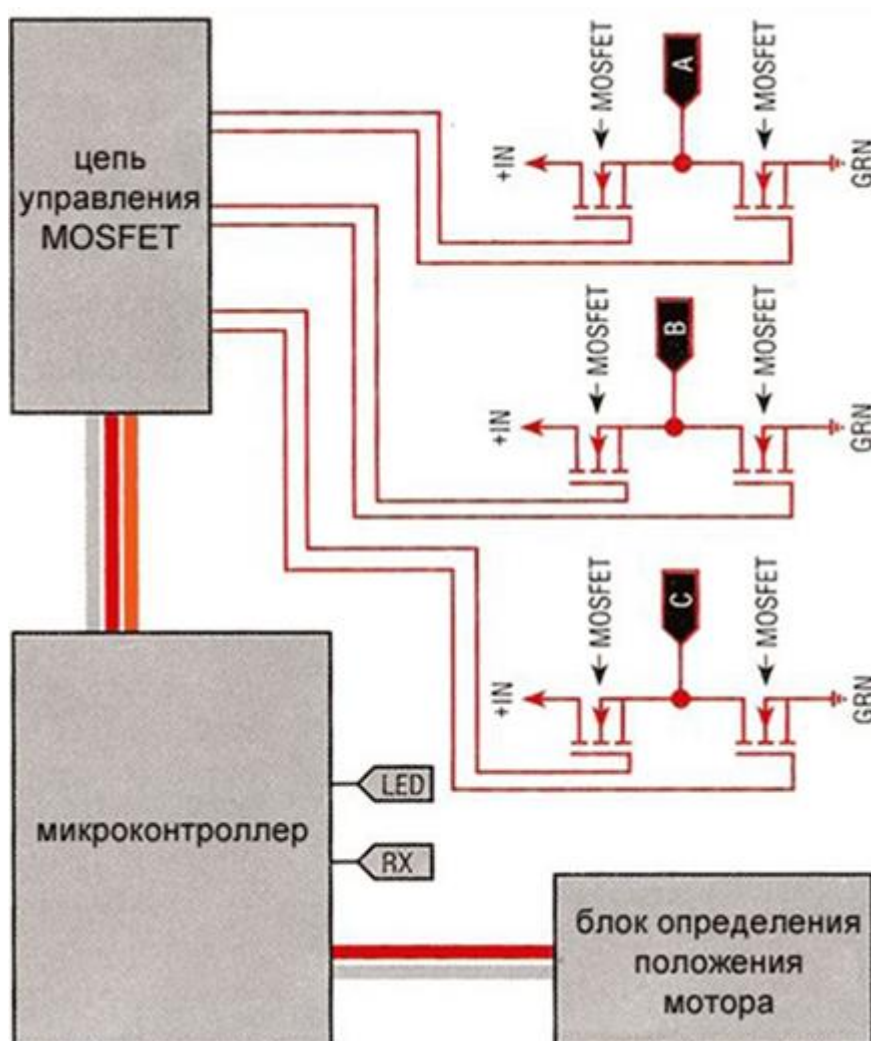


Рисунок 1.14 – Функциональная диаграмма работы электронного микроконтроллера скорости

Каждый раз, увеличивая количество ключей на фазу в 2 раза мы соответственно снижаем общее сопротивление ключей в 2 раза. Как альтернативу использованию нескольких параллельных ключей, можно устанавливать более качественные ключи.

Цепь управления MOSFET'ами

Управление ключами не такая простая задача, как может показаться на первый взгляд. Если посмотреть на электрическую схему, мы обнаружим, что у ключей три контакта. Контакт, по которому ток втекает в транзистор, называется "исток", контакт, по которому ток вытекает, называется "сток", контакт, который отходит в сторону называется "затвор", это переключатель ключа. Для того, чтобы открыть ключ, необходимо на затвор подать напряжение на 5-10В выше чем подведено к истоку транзистора. Для нижней части ключей (которые подключены к отрицательному контакту батареи) это относительно просто, нам надо подать всего 10 вольт. Для того, чтобы открыть верхние ключи, которые подключены к положительному контакту батареи, нужно приложить напряжение на 10 вольт выше чем напряжение силовой батареи. К примеру, если у нас батарея LiPo 4S, к верхнему транзистору подведено напряжение 14.8В, но для того, чтобы открыть ключ, к затвору нужно подвести напряжение в 25В. Разработчики регуляторов используют готовые блоки управления ключами, или разрабатывают собственные.

Блок определения положения ротора

Для того, чтобы знать, когда открывать и закрывать ключи, регулятор должен знать положение магнитов ротора вращающегося мотора. Это самая хитрая функция регулятора и именно поэтому раньше моторы и регуляторы использовали дополнительные датчики определения положения ротора (схема с сенсором до сих пор популярна в автомобильном хобби). Бессенсорные регуляторы, как видно из названия, обходятся без сенсора и используют уникальный алгоритм определения положения ротора: в каждый момент времени регулятор использует только 2 фазы для питания мотора, третья фаза при этом полностью отключена. Вращающееся магнитное поле наводит ЭДС в третьей обмотке. Измерив и проанализировав наведенное напряжение, можно определить, как далеко провернулся магнит, и понять, когда нужно закрыть текущую пару ключей и открыть следующую.

Микроконтроллер и его программное обеспечение

Без сомнения, микроконтроллер — это мозг всего процесса. Принцип его работы во многом схож с обычным компьютером: программисты пишут программу, компилируют и загружают ее в память контроллера. Микроконтроллер выполняет программу и в соответствии с ней посылает управляющие сигналы в цепь управления ключами, определяет положение мотора, обрабатывает сигналы с приемника, вычисляет требуемую выходную мощность и мигает светодиодом.

Обработка сигнала с приемника стандартна. Управляющий сигнал — это серия импульсов, длина которых определяет выходную мощность. Ширина импульса в 1мс означает полностью убранный газ, 2мс - полностью открытый. Величина частичного открытия газа определяется шириной импульса между этими двумя значениями. Внешне все просто, но микроконтроллеру важно при этом еще и успевать отслеживать положение мотора, чтобы не пропустить момент переключения ключей.

Работа мотора на среднем газу гораздо более сложный процесс, нежели работа на полном газе. Вместо того, чтобы оставить два ключа открытыми на определенное время, микроконтроллер открывает один ключ и быстро начинает открывать и закрывать второй. На малом газу второй ключ закрыт большую часть времени, в то время как при приближении к полному газу, он открыт почти все время. Частота, с которой контроллер открывает/закрывает второй ключ, называется PWM-частотой.

2 ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

2.1 Математическое описание бесколлекторного двигателя постоянного тока и его Simulink-модель

Уравнение электрического равновесия якорной цепи

Уравнение электрического равновесия якорной цепи описывается следующей системой дифференциального и алгебраического уравнений в абсолютных единицах:

$$U = e + Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$e = K_e \omega \quad (2.2)$$

где U – напряжение на якорной обмотке двигателя, В;

e – электродвижущая сила (ЭДС) якоря, В;

R – сопротивление обмотки якоря, Ом;

i – ток якоря, Ам;

L – индуктивность якорной цепи, Гн;

K_e – коэффициент ЭДС, В/рад/с;

ω – скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Уравнение движения двигателя

Уравнение движения двигателя, представленное формулами (2.3, 2.4) является видоизмененной записью основного уравнения движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3)$$

$$M = K_m i \quad (2.4)$$

где M – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления движению, Н·м;

J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки, кг·м²;

K_m – коэффициент электромагнитного момента, Н·м/А.

С точки зрения будущей модели, входными воздействиями являются напряжения якоря U и момент сопротивления движению M_c , выходными

переменными – электромагнитный момент двигателя M и частота вращения вала двигателя ω , а переменными состояния – переменные, расположенные под знаком производной (ток якоря i и частота вращения вала двигателя ω). Остальные переменные, входящие в состав уравнений (2.1 – 2.4) являются параметрами, численные значения которых, необходимо будет задавать при проведении расчетов.

Применим к дифференциальным уравнениям (2.1, 2.2) преобразование Лапласа. Дифференциальное уравнение (2.1), связывающее ток якоря и падение напряжения на якоре в преобразовании Лапласа имеет вид:

$$i(s) = [U(s) - e(s)] \frac{1}{R + Ls} \quad (2.5)$$

Уравнение (2.3), связывающую динамический момент и скорость вращения вала двигателя, в преобразовании:

$$\omega(s) = \frac{M(s) - M_c(s)}{Js} \quad (2.6)$$

В итоге, используя уравнения (2.3) – (2.6), составляется в MATLAB/Simulink модель двигателя. Схема модели представлена на рис. 2.1.

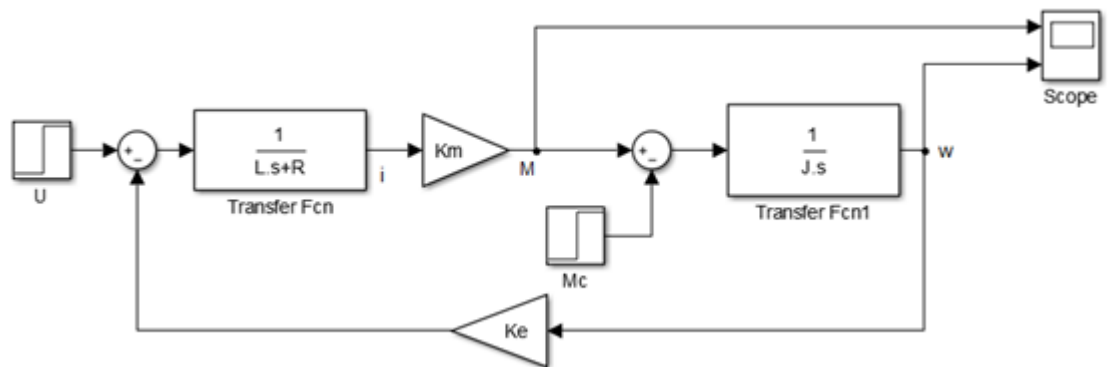


Рисунок 2.1 – Схема моделирования ДПТ

2.2 Моделирование запуска двигателя в MATLAB/SIMULINK

Уравнение электрического равновесия якорной цепи

По уравнению (2.1), можно получить уравнение для трехфазной цепи:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Эквивалентная схема фаз двигателя приведена на рис. 2.2.

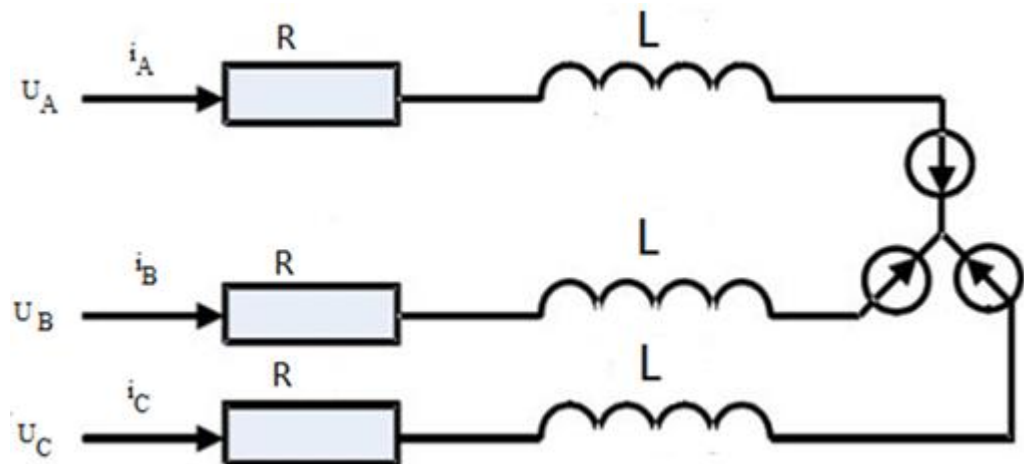


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема фаз двигателя

Уравнение электромагнитного момента

Соотношение между входной мощностью обмотки статора и электромагнитным моментом:

$$e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C = M \cdot \omega \quad (2.8)$$

Магнитное поле, создаваемое обмотками статора и токами ротора, генерирует электромагнитный момент, пропорциональный магнитному полю и обратно пропорциональный угловой скорости вращения.

2.3 Моделирование бесколлекторного двигателя постоянного тока

Модель двигателя состоит из 3 частей: Модель уравнения напряжения, Модель ЭДС, модель крутящего момента двигателя.

2.3.1 Модель уравнений напряжений

По уравнению (2.7) в Simulink создаётся модель напряжения, которая представлена на рис 2.3.

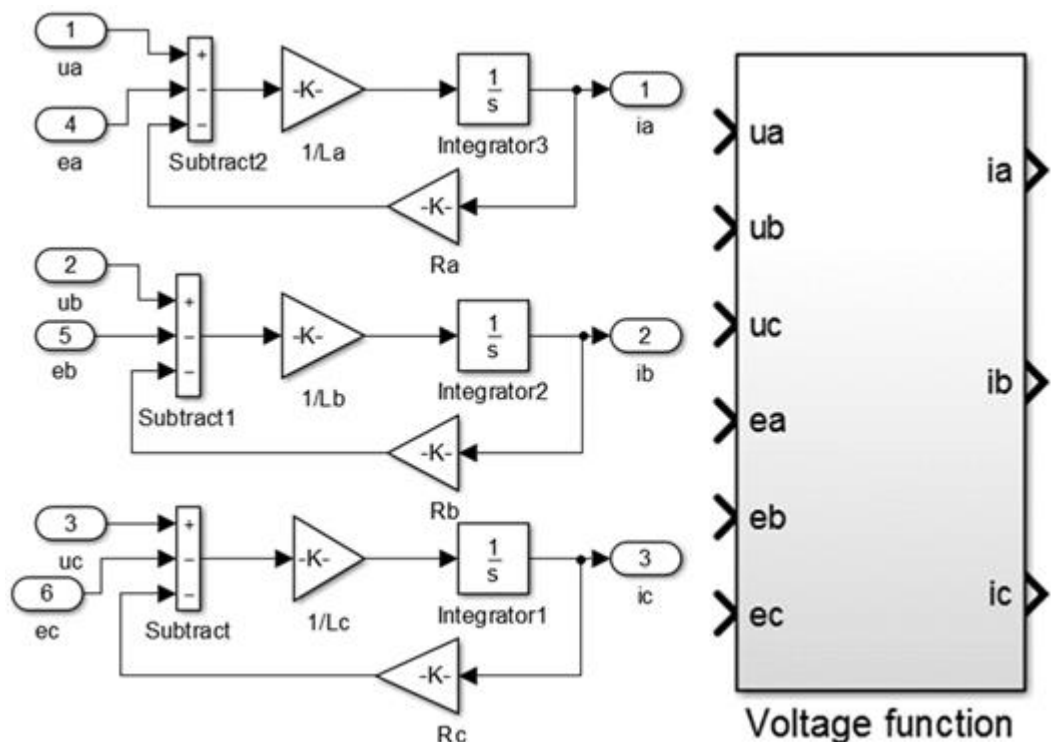


Рисунок 2.3 – Субблок и блок уравнений напряжения

2.3.2 Модель электродвижущей силы

Для определения цикла электродвижущей силы двигателя бесколлекторного постоянного тока разделим на шесть стадии оси положения ротора от 0 до 2π см. рис.2.4. Для каждой фазы обмотки, угол каждой стадия составляет $\pi/3$, а разности фаз обмотки на $2\pi/3$. В соответствии с положением ротора и скорости двигателя, можем определить для каждой фазы обмотки электродвижущую силу.

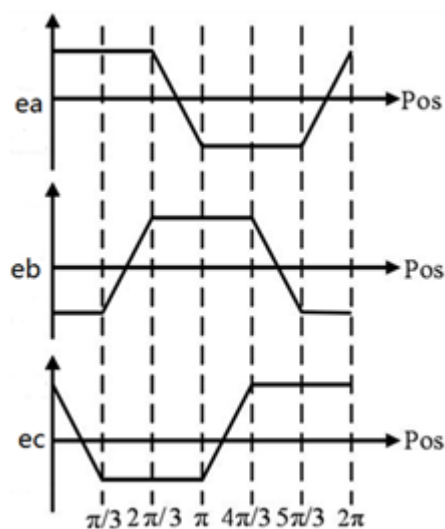


Рисунок 2.4 – График изменения электродвижущей силы в каждой фазе

Линейная зависимость между положением ротора и электродвижущей силой представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость между положением ротора и электродвижущей силой

Положение ротора	0	$\pi/3$	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	$5\pi/3$	2π
e_a	1	1	-1	-1	-1	-1	1
e_b	-1	-1	1	1	1	-1	-1
e_c	1	-1	-1	-1	1	1	1

Используя данные таблицы создаётся модель ЭДС:

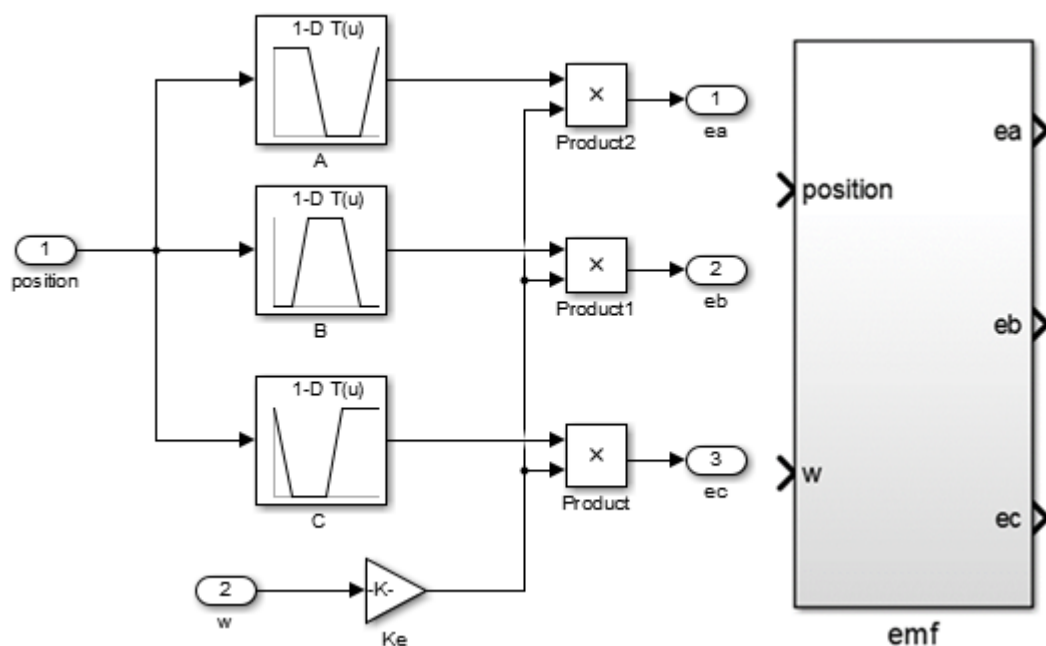


Рисунок 2.5 – Субблок и блок электродвижущей силы

Показано на рис.2.5, сигнал положения ротора position (диапазон $0 \sim 2\pi$), через блок одномерной таблицы (Look-Up Table), на модели, используя формулу (2.2), получаем ЭДС каждой фазы как результат умножения частоты ω на коэффициент K_e .

2.3.3 Модель электромагнитного момента двигателя

Используя уравнению (2.6) и (2.8), получаем частоту вращения двигателя в зависимости от электромагнитного момента, положения ротора и угла. Данная модель представлена на рис.2.6, 2.7.

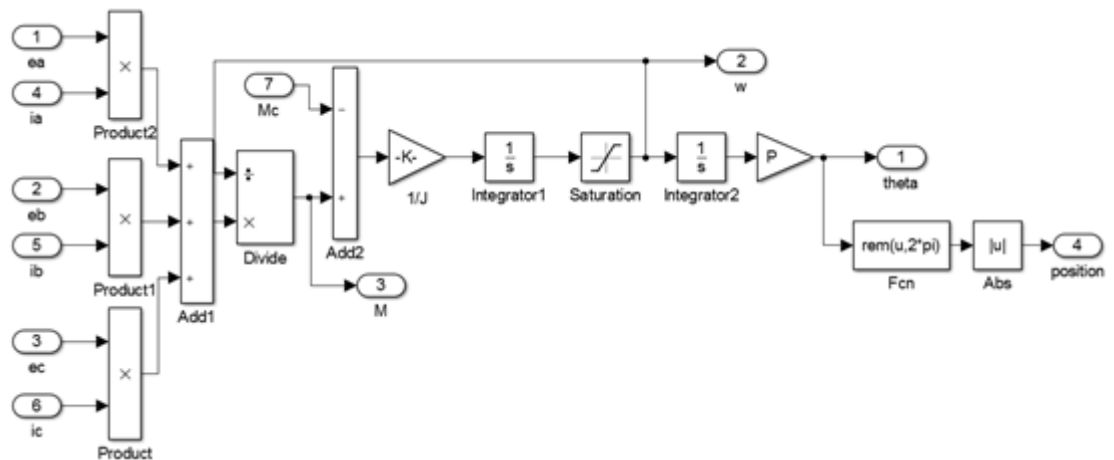


Рисунок 2.6 – Субблок электромагнитного момента двигателя

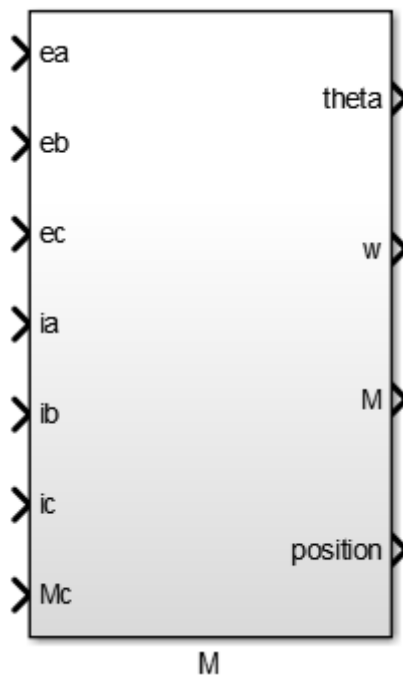


Рисунок 2.7 – Блок электромагнитного момента двигателя

Из модели электромагнитного момента двигателя, создаём модель детектирования положения ротора, см. рис. 2.8. Используем блок задания

функции Fcn, который позволяет определить остаток от деления аргумента $\text{rem}(u, 2\pi)$. Это операция позволяет определить положение ротора. Выходной сигнал положения ротора (position) в диапазоне от $0 \sim 2\pi$ является входным сигналом для модуля ЭДС.

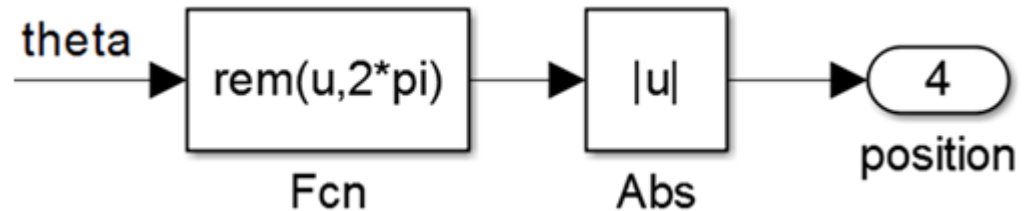


Рисунок 2.8 – Модель детектирования положения ротора

2.3.4 Общая модель двигателя постоянного тока

Соединив рассмотренных выше 3 блока, получаем модель двигателя, см.рис.2.9 и 2.10.

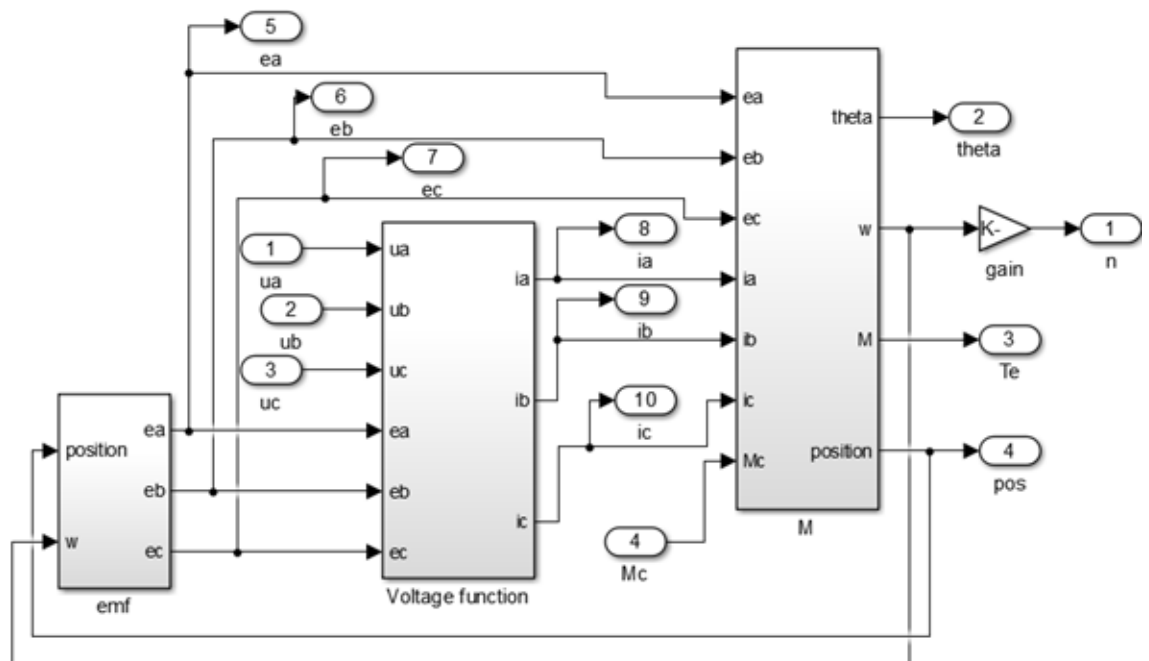


Рисунок 2.9 – Субблок двигателя

Для получения скорости вращения n используется в модели коэффициент равен 9.55 ($n = 60\omega/2\pi = 9.55\omega$).

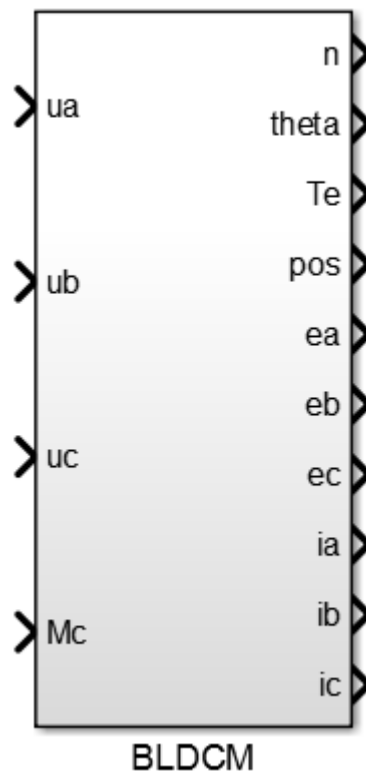


Рисунок 2.10 – Модель двигателя

2.4 Привод системы управления двигателя

Модель привода двигателя состоит из 4 частей: 1) Модель регулирования скорости; 2) Модель тока сравнения; 3) Модель контроля гистерезиса тока (Current Hysteresis Control); 4) Модель преобразования напряжения.

2.4.1 Модель регулирования скорости

Используем ПИ регулятор скорости двигателя, получаем структуру, представленную на рисунке 2.11:

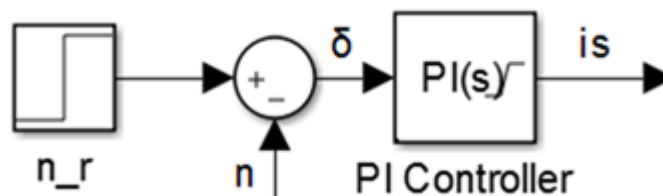


Рисунок 2.11 – Модель регулирования скорости

Значение заданной скорости (n_r) сравнивается с фактической скорости n . Полученная разность δ , является входным сигналом для ПИ регулятора, выходным сигналом ПИ регулятора является амплитуда ток i_s .

Настройка ПИ-регулятора указаны на рис. 2.12.

The image shows the 'PID Advanced' configuration window in MATLAB/Simulink. The 'Main' tab is active. The 'Controller parameters' section includes a 'Source' dropdown menu set to 'internal', a 'Proportional (P)' input field with the value 0.017, and an 'Integral (I)' input field with the value 0.01.

Рисунок 2.12 – Настройка ПИ-регулятор скорости

2.4.2 Модель тока сравнения

Структура показана на рисунок 2.13. Действие основано на использовании тока i_s , который экспортируется с ПИ регулятора, и сигнала положения ротора (pos). Заданные значения токов обмотки в зависимости от положения ротора, представлены в таблице 2.2.

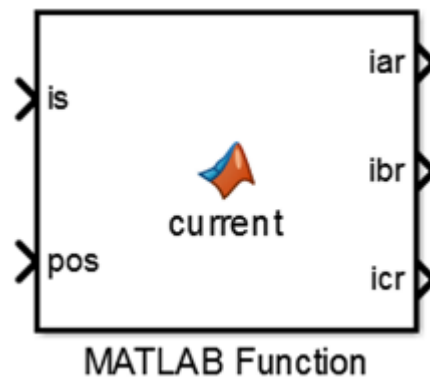


Рисунок 2.13 – Блок сравнения тока

На выходе модуля получаем заданные значения токов i_{ar} , i_{br} , i_{cr} .

Таблица 2.2 – Зависимость заданных токов от положения ротора

Положение ротора	i_{ar}	i_{br}	i_{cr}
$0 \sim \pi/3$	i_s	$-i_s$	0
$\pi/3 \sim 2\pi/3$	i_s	0	$-i_s$
$2\pi/3 \sim \pi$	0	i_s	$-i_s$
$\pi \sim 4\pi/3$	$-i_s$	i_s	0
$4\pi/3 \sim 5\pi/3$	$-i_s$	0	i_s
$5\pi/3 \sim 2\pi$	0	$-i_s$	i_s

Для реализации работы алгоритма данного модуля создаётся программа в MATLAB/Simulink, используем функцию MATLAB Function.

Программа реализации алгоритма выбора заданных значений токов:

```
function [iar,ibr,icr] = current(is,pos)
% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
iar=is;
ibr=-is;
icr=0;
if(pos>=0&&pos<pi/3)
iar=is; ibr=-is; icr=0;
elseif(pos>=pi/3&&pos<2*pi/3)
iar=is; ibr=0; icr=-is;
elseif(pos>=2*pi/3&&pos<pi)
iar=0; ibr=is; icr=-is;
elseif(pos>=pi&&pos<4*pi/3)
iar=-is; ibr=is; icr=0;
elseif(pos>=4*pi/3&&pos<5*pi/3)
iar=-is; ibr=0; icr=is;
elseif(pos>=5*pi/3&&pos<=2*pi)
iar=0; ibr=-is; icr=is;
end
```

2.4.3 Модель контроля гистерезиса тока

Данная модель предназначена для получения ШИМ. Принципиальная схема, см. рис. 2.14, задаёт постоянное значение тока i^* для ширины гистерезиса $2HB$ (Hysteresis Band). Когда фактический ток i равен максимуму тока сравнения i^* , то сигнал ШИМ равен 0, и происходит закрытие устройства коммутации. Уменьшение тока обмотки i до минимума i^* , то сигнал ШИМ равен 1, и происходит открытие устройства коммутации и ток обмотка увеличивается.

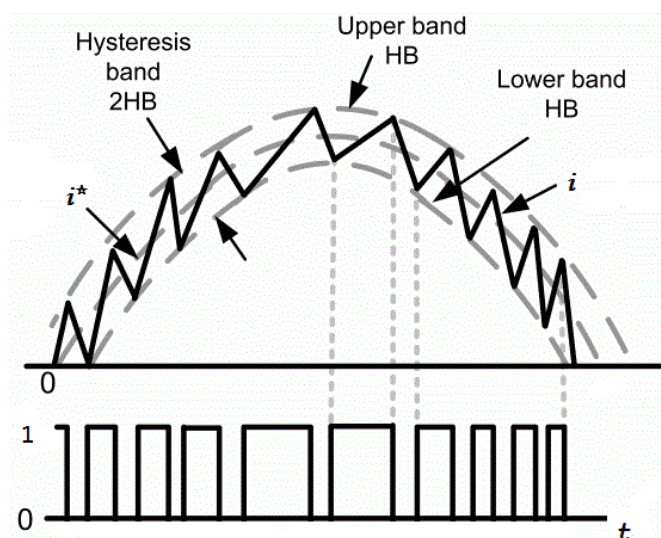


Рисунок 2.14 – Схема принципа контроля гистерезиса тока

Работа модели по получению сигнала ШИМ управляется моделью контроля гистерезиса тока, рисунок 2.15, используя блок реле (Relay) для установления ширины гистерезиса НВ.

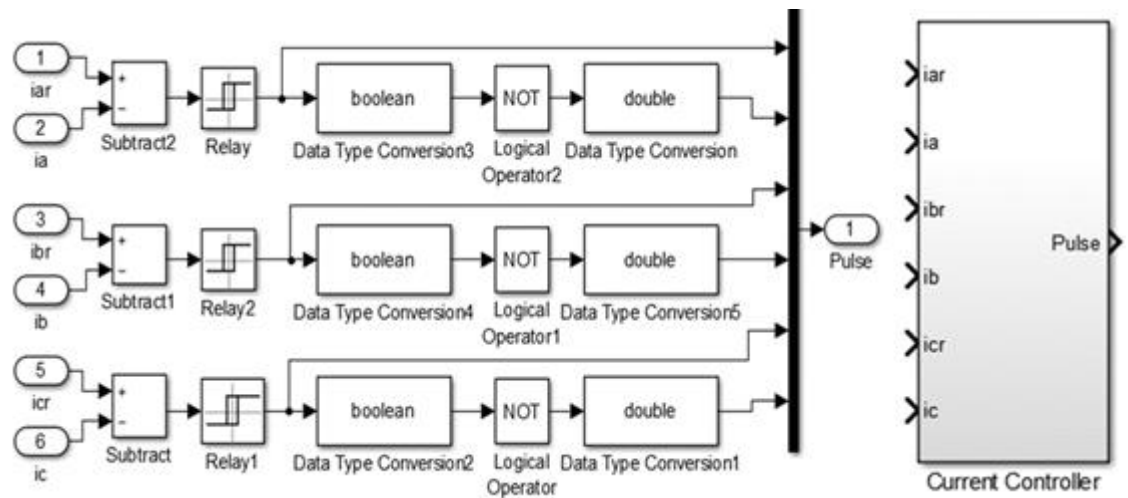


Рисунок 2.15 – Субблок и блок контроля гистерезиса тока

2.4.4 Модель преобразователя напряжения

Функция преобразователя напряжения позволяет изменять напряжение аккумулятора до напряжения питания двигателя, с целью чтобы управлять скоростью двигателя.

Модель преобразователя напряжения, см. рис. 2.16, содержит блок питания постоянного тока (DC Voltage Source) и универсальный мост (Universal Bridge), которые выбраны из библиотеки SimPowerSystems. Данная модель содержит 3 плеча силовых электронных устройств MOSFET, которые позволяют управлять трехфазным мостом бесколлекторного двигателя постоянного тока.

Кроме того, данная модель содержит 3 блока измерения напряжения (Voltage).

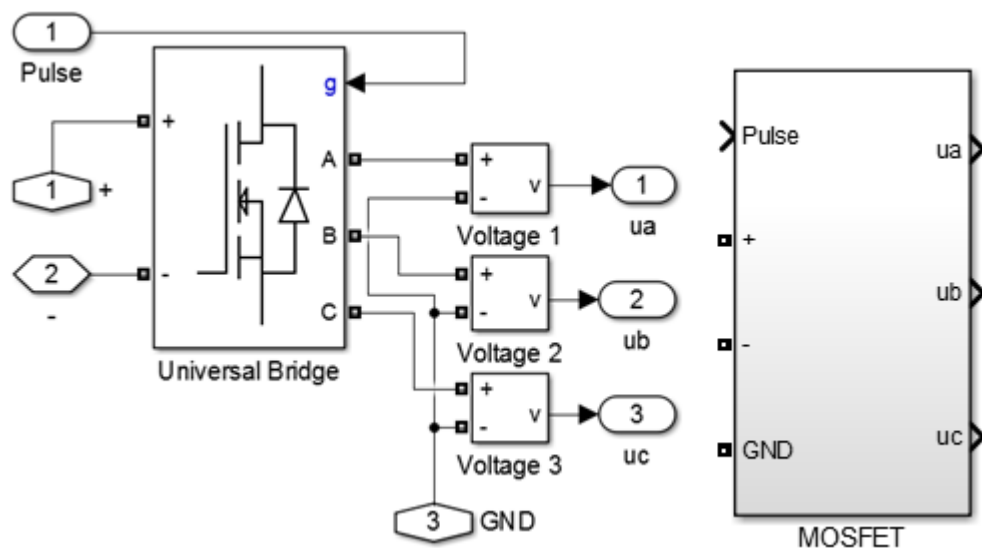


Рисунок 2.16 – Субблок и блок преобразователя напряжения

2.4.5 Общая схема электропривода бесколлекторного двигателя постоянного тока

Соединим упомянутые выше блоки, получим полную модель общей схемы электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока см.рис.2.17.

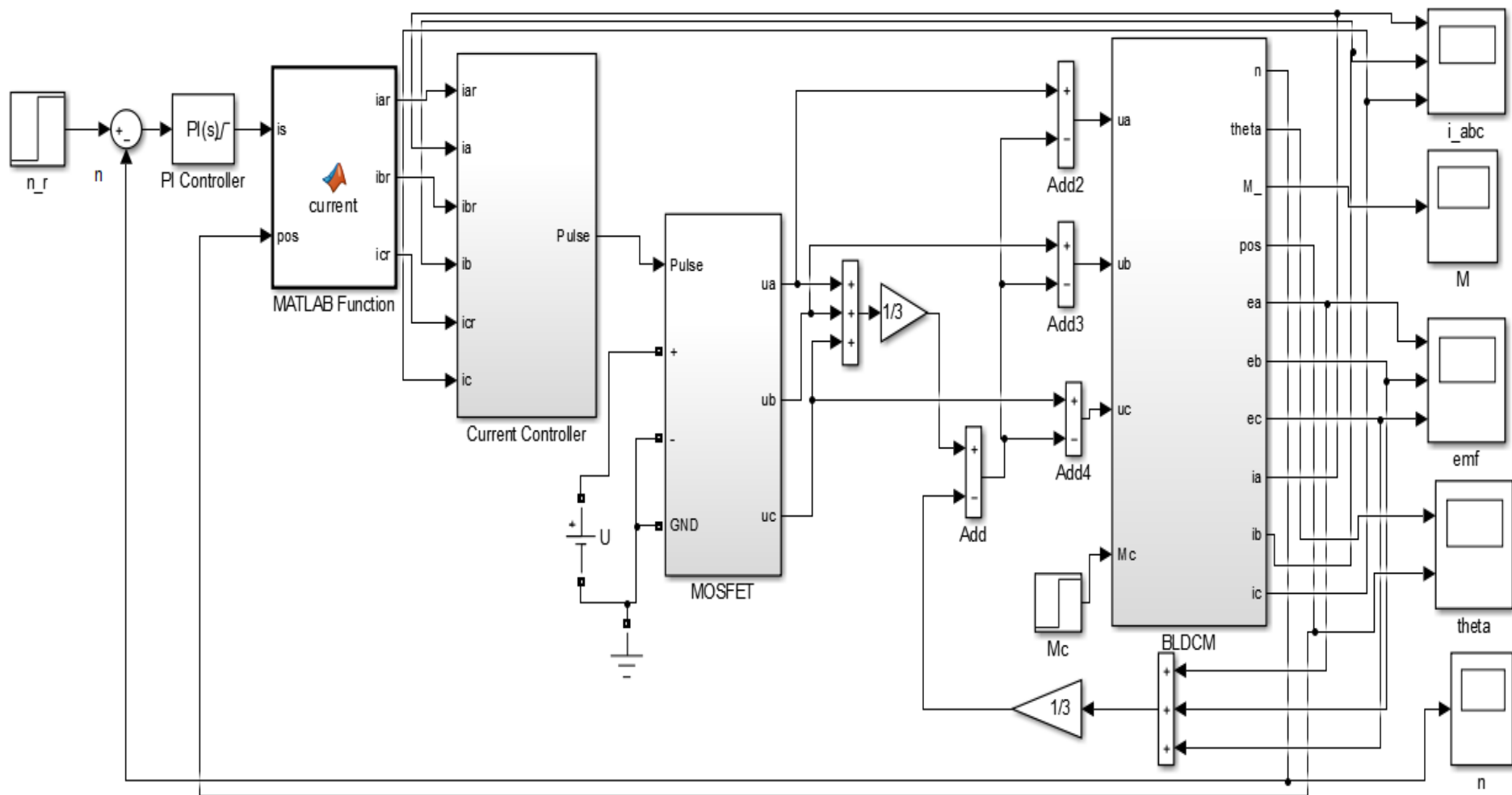


Рисунок 2.17 – Общая схема электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Определение передаточных функций двигателя постоянного тока

Для получения выражения передаточных функций ДПТ воспользуемся моделью, представленной на рис. 2.1.

Используя правила структурных преобразований, можем записать:

$$W_{\omega,U}(s) = \frac{W_1(s) \cdot k_m \cdot W_2(s)}{1 + W_1(s) \cdot k_m \cdot W_2(s) \cdot k_e} \quad (3.1)$$

где

$$W_1(s) = \frac{1}{L \cdot s + R} \quad (3.2)$$

$$W_2(s) = \frac{1}{J \cdot s} \quad (3.3)$$

Подставив (3.2) и (3.3) в уравнение (3.1), и, выполнив ряд преобразований получаем:

$$W_{\omega,U}(s) = \frac{k_m}{(L \cdot s + R) \cdot J \cdot s + k_m \cdot k_e} \quad (3.4)$$

Разделим и числитель и, знаменатель на $km \cdot ke$, и разделим $L \cdot J$ на R получаем:

$$W_{\omega,U}(s) = \frac{k}{T_{\text{я}} T_M s^2 + T_M s + 1} \quad (3.5)$$

где $T_M = R \cdot J / C^2$ – электромеханическая постоянная времени двигателя;
 $C = km \cdot ke$;

$T_{\text{я}} = L / R$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи;

$k = 1 / C$ – коэффициент усиления.

Параметр двигателя (см. таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Данные двигателя [9]

Сопротивление обмотки статора, R	0.4 Ом
Индуктивность якорной цепи, L	0.954e-3 Гн
Момент инерции, J	1.89e-6 кг·м ²
Частота вращения двигателя, ω	314 рад/с
Напряжение, U	11 В
Коэффициент ЭДС, K_e	0.035 В/рад/с
Коэффициент электромагнитного момента, K_m	0.035 Н·м/А

В ПП MatLab с учётом данных таблицы 3.1 получим ПФ двигателя по напряжению, подаваемому в якорную цепь.

```
>> W1=tf([1],[0.954e-3 0.4])
```

W1 =

$$\frac{1}{0.000954 \text{ s} + 0.4}$$

Continuous-time transfer function.

```
>> W2=tf([1],[1.89e-6 0])
```

W2 =

$$\frac{1}{1.89e-06 \text{ s}}$$

Continuous-time transfer function.

```
>> W12=W1*W2*0.035
```

W12 =

$$0.035$$

$$1.803e-09 s^2 + 7.56e-07 s$$

Continuous-time transfer function.

```
>> W=feedback (W12,0.035)
```

W =

$$0.035$$

$$1.803e-09 s^2 + 7.56e-07 s + 0.001225$$

Continuous-time transfer function.

Разделив коэффициенты ПФ на 0.001225, получаем выражение ПФ ДПТ:

$$W(s) = \frac{28.57}{1.47 \times 10^{-6} s^2 + 6.17 \times 10^{-4} s + 1} \quad (3.6)$$

3.2 Определение показателей качества процесса регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока

Определение показателей качества ДПТ по переходной и частотным характеристикам с использованием ПФ (3.6) и ПП MatLab представлено на рис. 3.1 и 3.2.

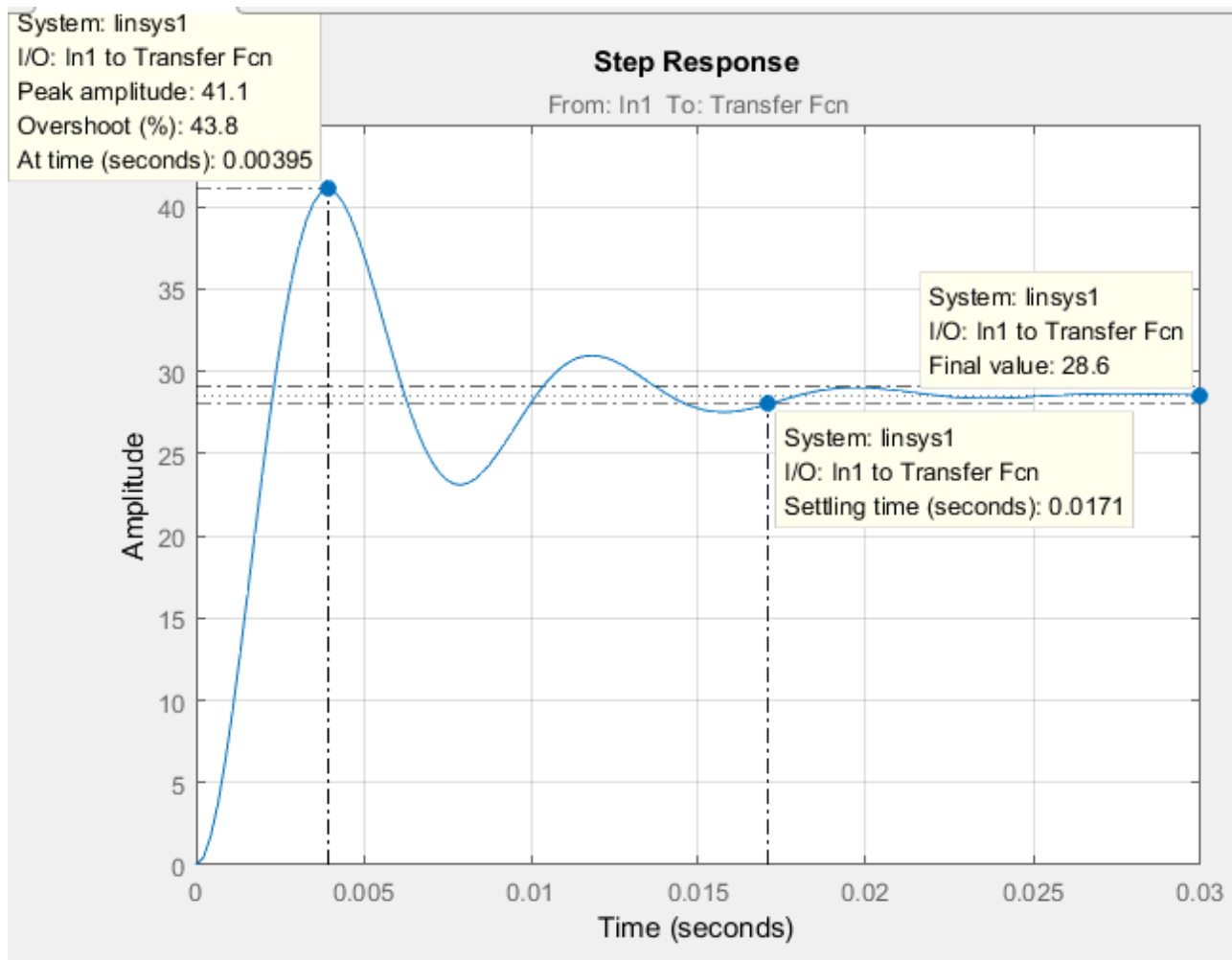


Рисунок 3.1 – График переходной характеристики

По переходной характеристике, рис.3.1 определяем следующие показатели качества:

Перерегулирование: 43.8%.

Время переходного процесса: 0.0171 с.

Время нарастания: 0.00395 с.

Максимальное значение: 41.1.

Коэффициент ДПТ: 28.6.

Качество процесса регулирования удовлетворяют требованиям, предъявляем к ДПТ.

По логарифмическим частотным характеристикам, рис.3.2 определяем:
Запас по фазе φ : 5.55° .

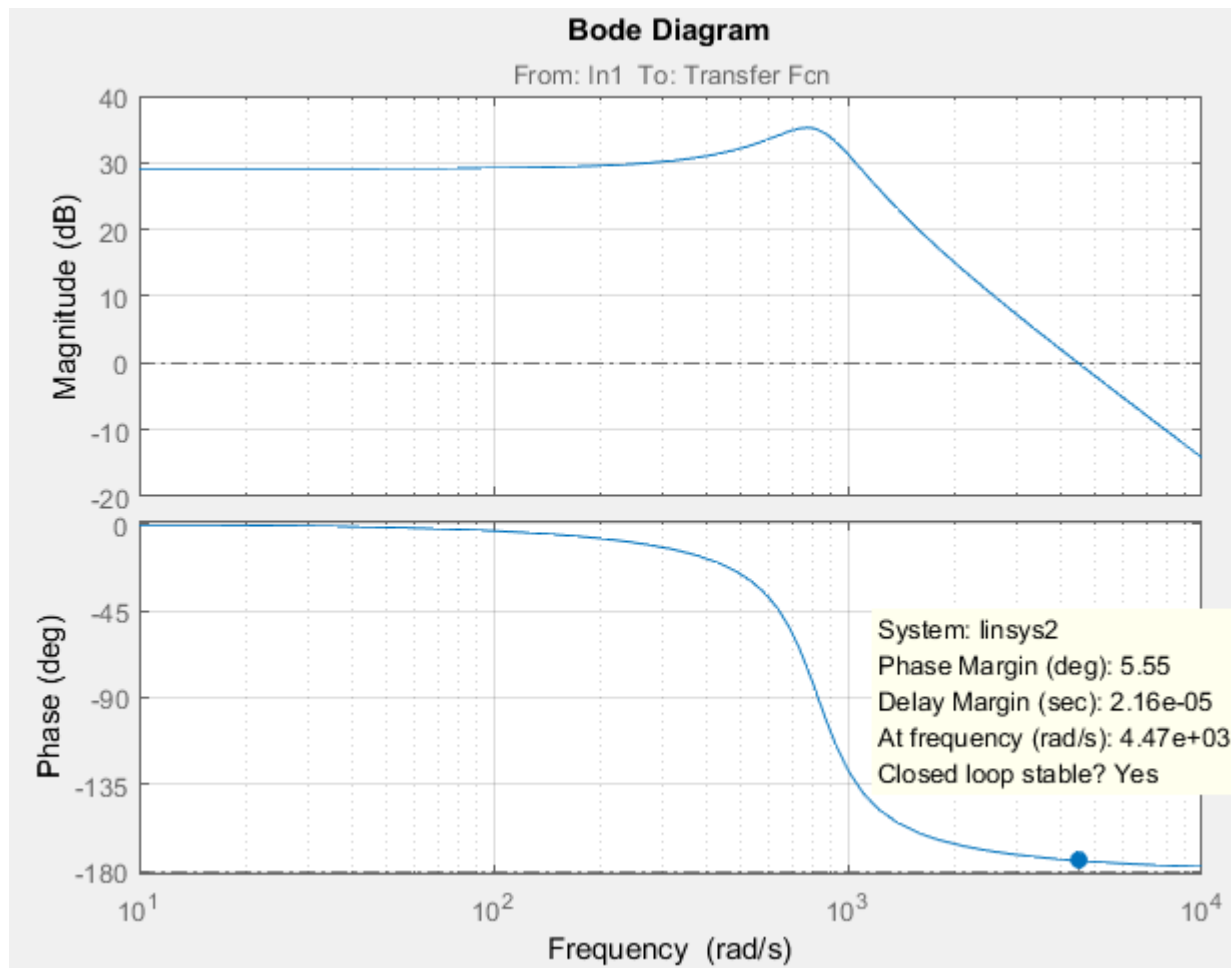


Рисунок 3.2 – Логарифмические частотные характеристики

3.3 Исследование влияния нагрузки на работу двигателя постоянного тока

Влияние нагрузки на работу двигателя выражается моментом сопротивления M_c . Для исследования влияния M_c на электромагнитный момент M и частоту вращения двигателя ω была реализована ранее разработанная модель 2.1 с учётом данных таблицы 3.1. Схема моделирования представлена на рис. 3.3.

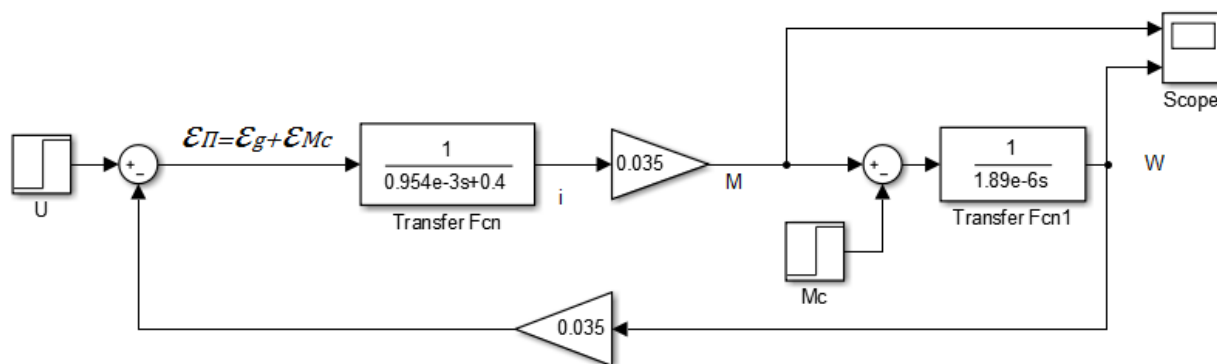


Рисунок 3.3 – Схема моделирования ДПТ с заданными параметрами

Результаты проведённых исследований приведены на рис.3.4. Влияние момента M проявляется после истечения $t = 0.03$ с, когда момент сопротивления M_c достигнет величины $M_c = 0.05$ Н·м.

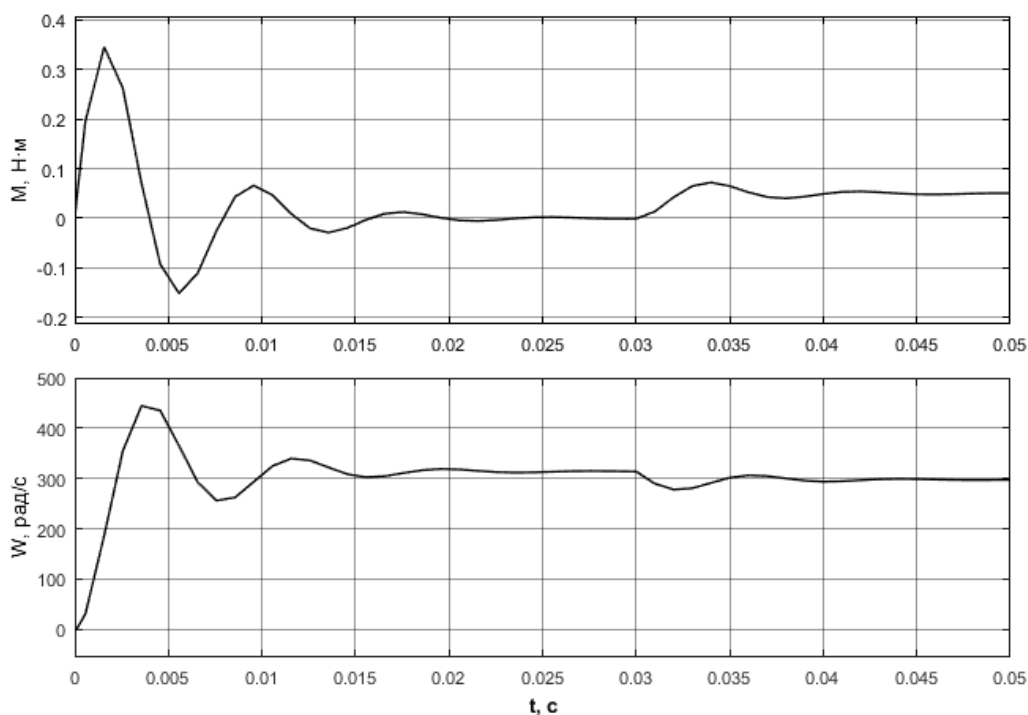


Рисунок 3.4 – Графики влияния нагрузки на M и ω

Определение показателей качества приведены на рис. 3.5.

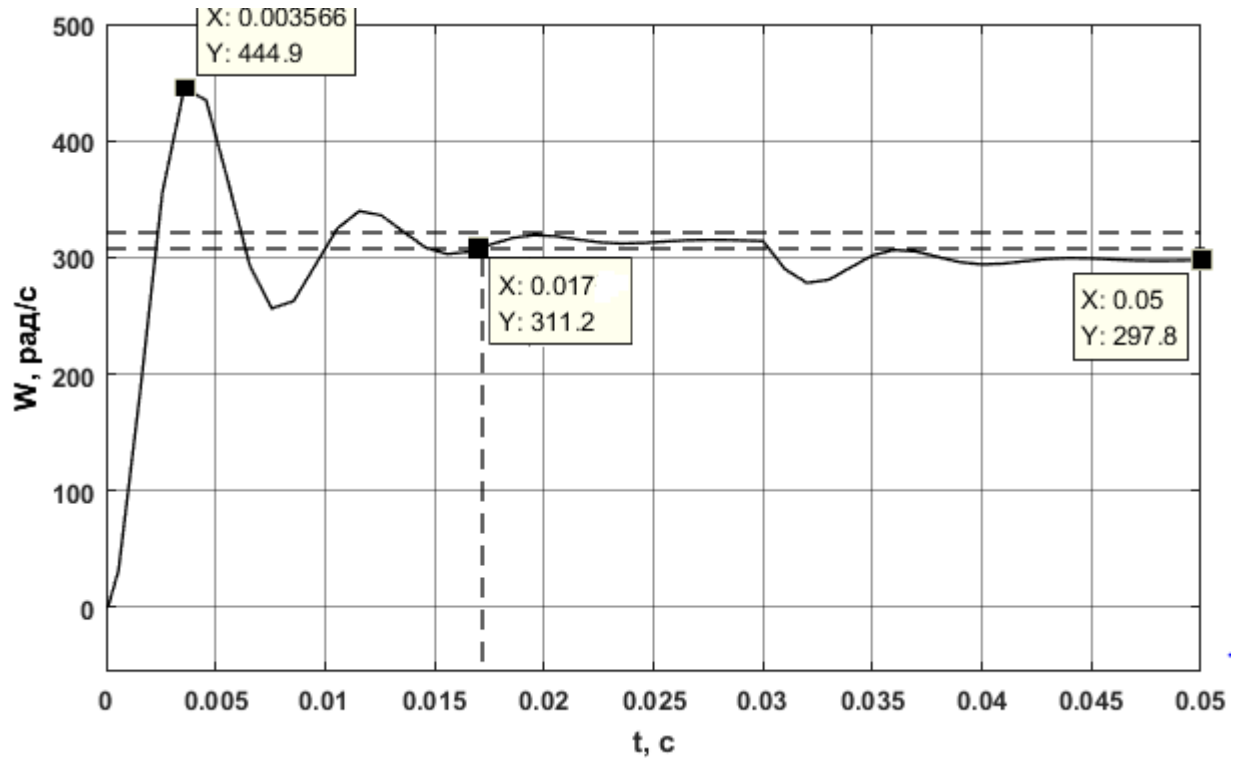


Рисунок 3.5 – Графики изменения частоты вращения ДПТ во времени
Определяем следующие показатели качества:

Перерегулирование: $\sigma = \frac{\omega_{max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{444.9 - 314}{314} \cdot 100\% = 41.69\%.$

Время переходного процесса: 0.017 с.

Время нарастания: 0.003566 с.

Максимальное значение: 444.9 рад/с.

Коэффициент ДПТ: $K_{ДПТ} = \frac{314}{11} = 28.55.$

Статическая ошибка: $\delta = \frac{314 - 297.8}{314} \cdot 100\% = 5.16\% .$

3.4 Оценка точности процесса регулирования двигателя постоянного тока

Точность регулирования оценивается ошибками регулирования [14]:

$$\mathcal{E}_\Pi = \mathcal{E}_g + \mathcal{E}_{Mc} \quad (3.7)$$

где $\mathcal{E}_\Pi$ – полная ошибка;

$\mathcal{E}_g$ – ошибка от задающего воздействия;

$\mathcal{E}_{Mc}$ – ошибка от нагрузки, которая выражается моментом сопротивления M_c .

Ошибку от задающего воздействия $\mathcal{E}_g$ можно определить по формуле [14]:

$$\varepsilon_g = W_{zc}^\varepsilon(s)_{/s \rightarrow 0} \cdot g_0 \quad (3.8)$$

где $W_{zc}^\varepsilon(s)$ – передаточная функция замкнутой системы по ошибке $\mathcal{E}$;

$g_0 = U = 11\text{В}$ – напряжение, подаваемое в обмотку ДПТ.

Согласно схеме моделирования ДПТ с заданными параметрами, рис. 3.4 получим выражение ПФ $W_{zc}^\varepsilon(s)$.

$$W_{zc}^\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{0.954 \times 10^{-3}s + 0.4} \cdot \frac{1}{1.89 \times 10^{-6}s} \cdot k_m \cdot k_e} \quad (3.9)$$

После преобразований получаем:

$$W_{zc}^\varepsilon(s) = \frac{(0.954 \times 10^{-3}s + 0.4) \cdot 1.89 \times 10^{-6}s}{(0.954 \times 10^{-3}s + 0.4) \cdot 1.89 \times 10^{-6}s + k_m \cdot k_e} \quad (3.10)$$

Тогда, согласно (3.8), получаем, что ошибка $\mathcal{E}_g$ равна 0.

Ошибку от возмущающего фактора (нагрузки) $\mathcal{E}_{Mc}$ можно определить по формуле [14]:

$$\varepsilon_{Mc} = W_{zc}^{Mc}(s)_{/s \rightarrow 0} \cdot Mc \quad (3.11)$$

где $W_{3c}^{Mc}(s)$ – передаточная функция замкнутой системы по возмущающему фактору.

$$M_c = 0.05 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Согласно схеме моделирования ДПТ с заданными параметрами, рис. 3.4 получим выражение ПФ $W_{3c}^{Mc}(s)$:

$$W_{3c}^{Mc}(s) = \frac{\frac{1}{1.89 \times 10^{-6}s}}{1 + \frac{1}{0.954 \times 10^{-3}s + 0.4} \cdot \frac{1}{1.89 \times 10^{-6}s} \cdot k_m \cdot k_e} \quad (3.12)$$

После преобразований получаем:

$$W_{3c}^{Mc}(s) = \frac{0.954 \times 10^{-3}s + 0.4}{(0.954 \times 10^{-3}s + 0.4) \cdot 1.89 \times 10^{-6}s + k_m \cdot k_e} \quad (3.13)$$

Тогда, используя (3.11), получаем:

$$\varepsilon_{Mc} = \frac{0.4 \cdot 0.05}{0.035 \cdot 0.035} = 16.33 \text{ рад. /с}$$

Переведём ошибку в %:

$$\delta_{ct, \%} = \frac{\varepsilon_{Mc}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{16.33}{314} \cdot 100\% = 5.2\%$$

Показатели качества процесса регулирования ДПТ определены по модели двигателя рис.2.1 и передаточным функциям (3.6) и (3.12) хорошо совпадают.

3.5 Результат моделирования

Токи якоря

Результат изменения токов якоря показан на рис.3.6. Влияние нагрузки на работу двигателя выражается M_c . Действие проявляется по истечении времени $t=0.025$ с, $M_c=0.05$ Н·м, генерируемый электромагнитный момент нагрузки M_c уравнивается электромагнитный момент M ДПТ. Фазовый сдвиг между токами обмоток равен 120° .

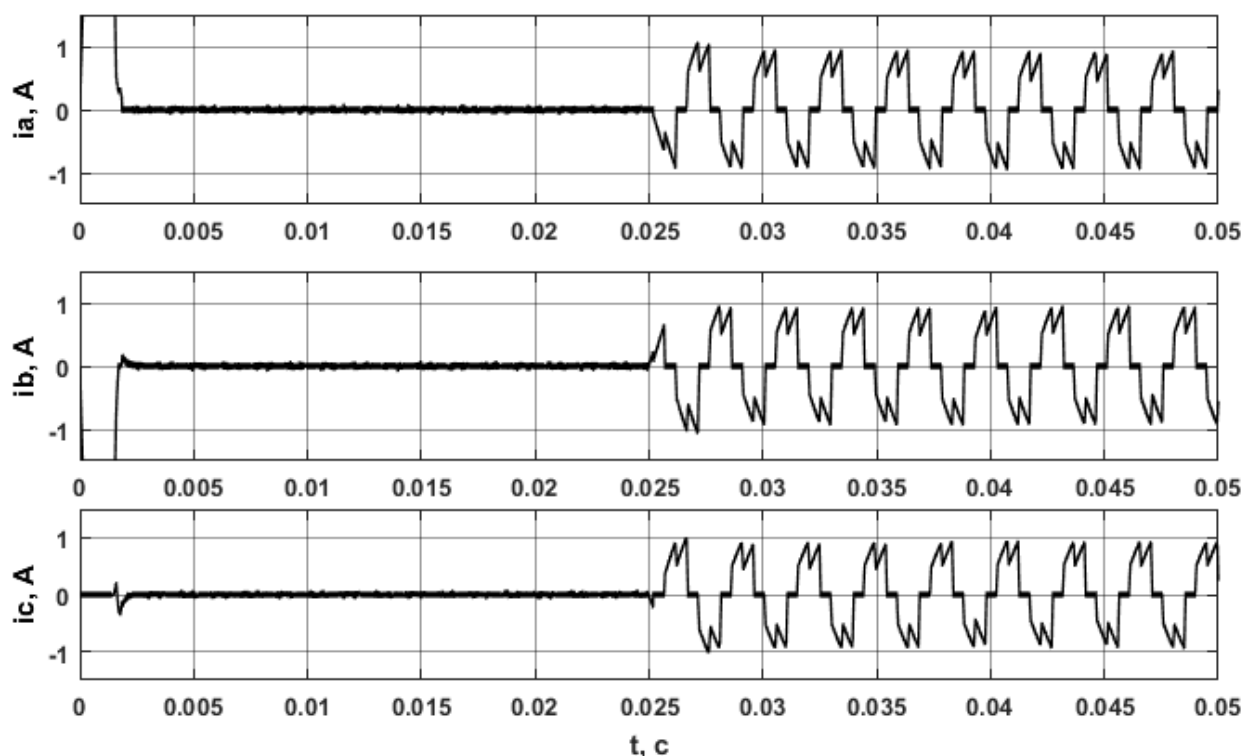


Рисунок 3.6 – График тока якоря

Электродвижущая сила

Результат изменения ЭДС в фазовых обмотках двигателя показан на рис.3.7. Форма волны противодействующей электродвижущей силы фазовых обмоток двигателя трапециевидная, разница фаз ЭДС равна 120° .

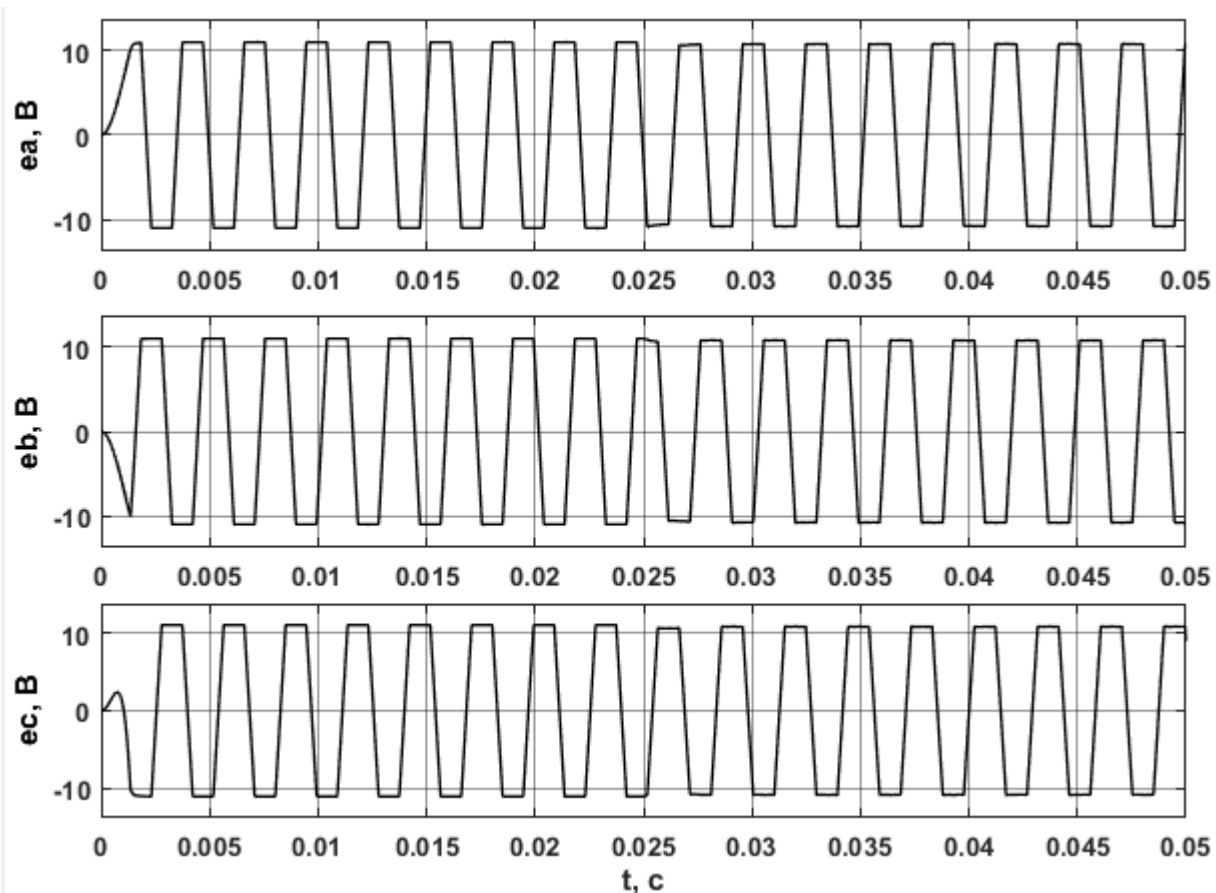


Рисунок 3.7 – График электродвижущей силы

Электромагнитный момент

Результат моделирования электромагнитного момента M показан на рис.3.8. В первый момент просматривается резкий скачок электромагнитного момента. Когда момент нагрузки становится равен $0.05 \text{ Н}\cdot\text{м}$ по истечении $t=0.025 \text{ с}$, происходит стабилизации электромагнитный момента двигателя.

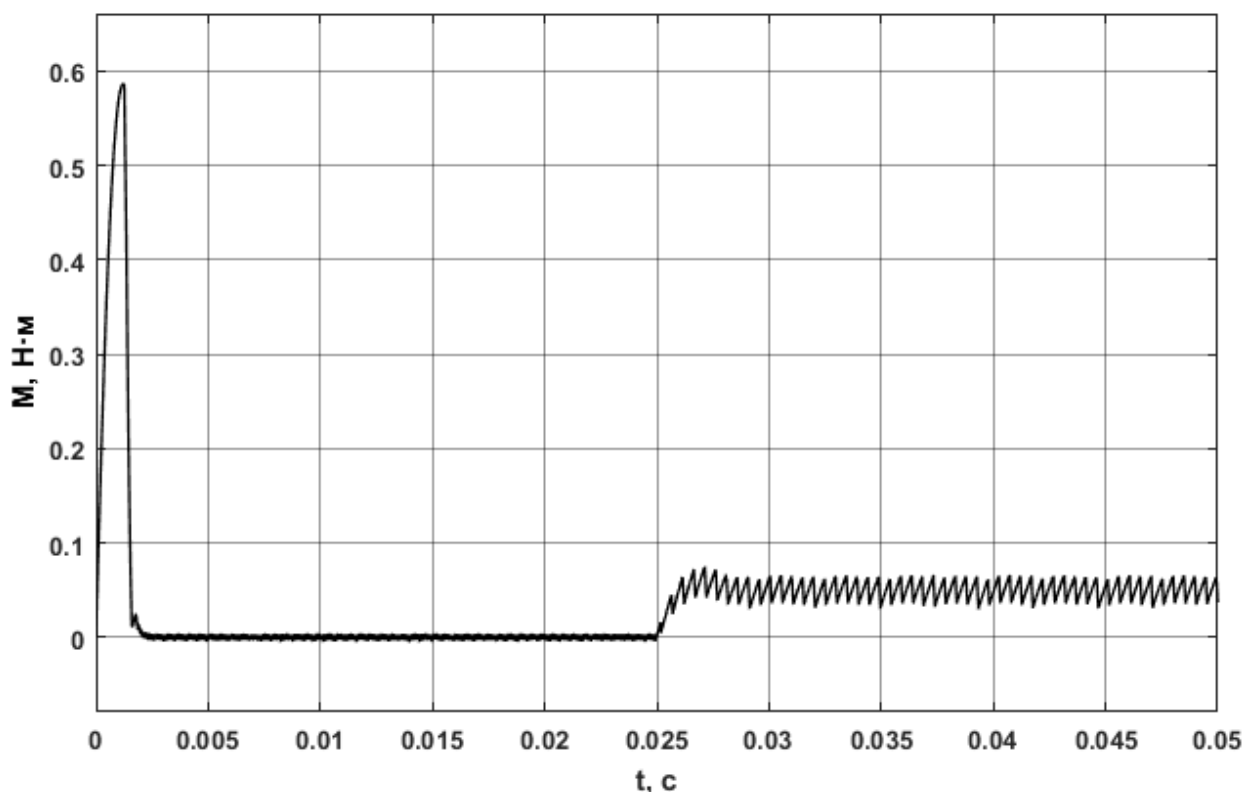


Рисунок 3.8 – График электромагнитного момента с набросом нагрузки

Угол и положения ротора

Результат изменения угла и положения ротора показан на рис.3.9. Верхний график показывает изменение угла вращающего ротора (θ). На начальной стадии роста скорость увеличивается. Угловым коэффициент θ растёт до 314 рад по линейному закону, значит скорость уже стабилизировалась. При достижении $t=0.025$ с, график углового коэффициента почти не изменяется, значит скорость практически не изменяется. Так как по истечению времени моделирования $t=0.05$ с, угол вращающего ротора (θ) равен $314 \cdot 0.05 \cdot 7 = 109.9$ рад, при числе пар плюсов $p = 7$.

На нижние графики показано положение ротора (position), после стабилизации скорости. За 1 пару плюсов, ротор проворачивается 2π .

При частоте вращения 314 рад/с, скорость вращения $n=3000$ об/мин, время моделирования $t=0.05$ с, число оборотов ротора равно 2.5, поэтому количество циклов должно быть $2.5 \cdot 7 = 17.5$, в соответствии с рисунком.

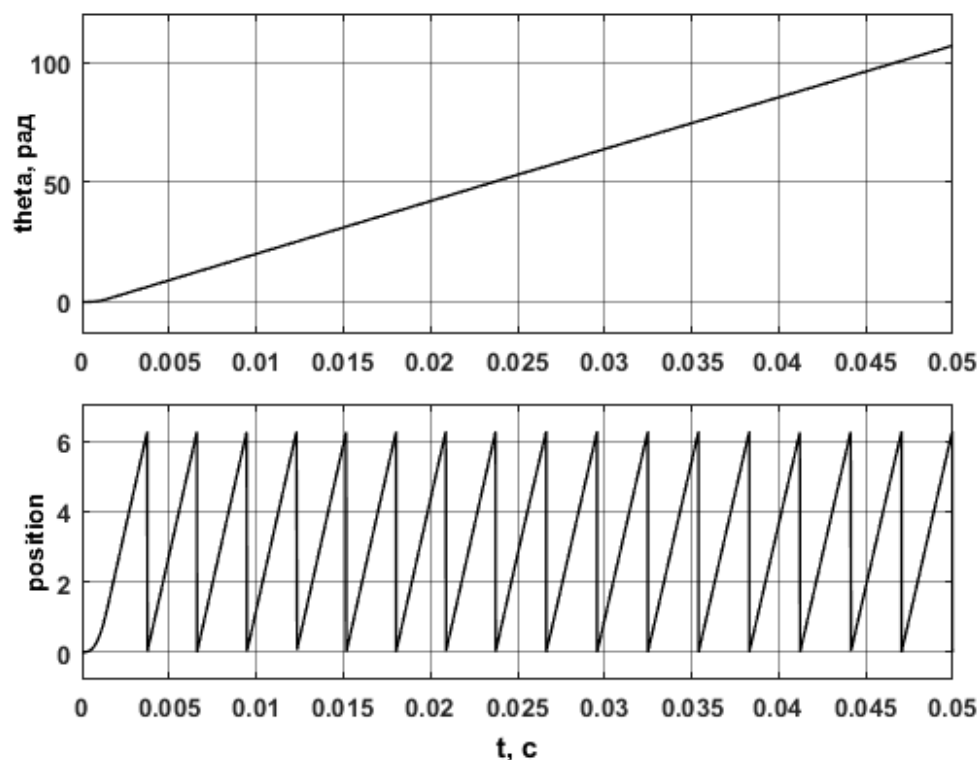


Рисунок 3.9 – График изменения угла и положения ротора

Скорость вращения

Результат изменения скорости двигателя показан на рис.3.10. Нужно значение скорость $n=3000$ об/мин двигатель набирает за время меньше 0.005с. При подключении нагрузки при $t=0.025$ с, происходит не значительной изменения скорости.

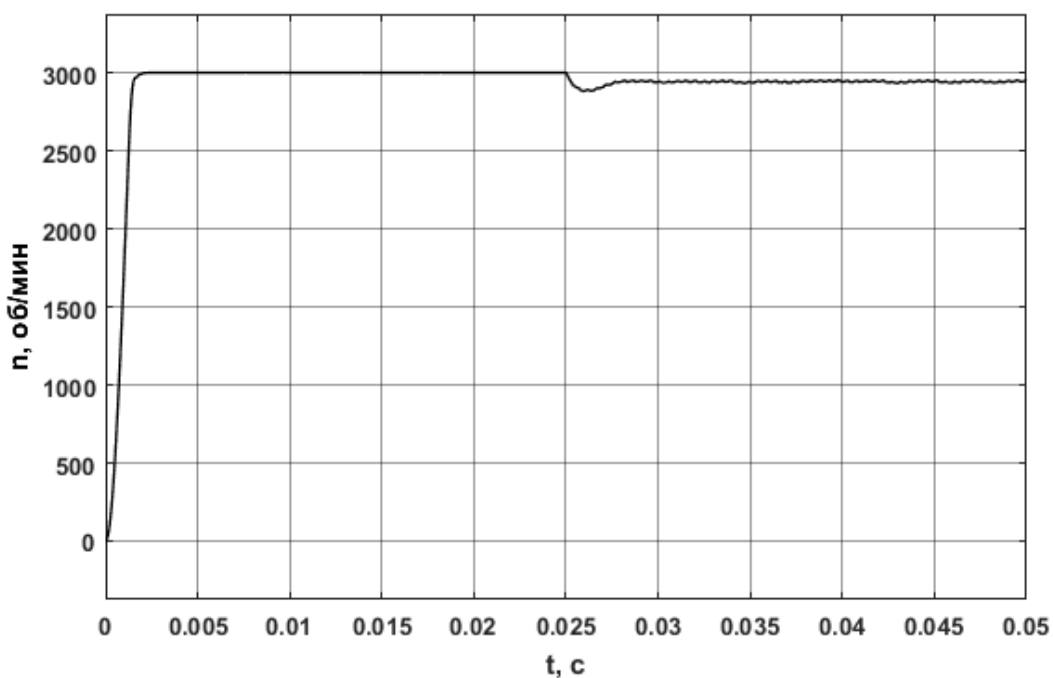


Рисунок 3.10 – График скорости вращения

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется главным образом коммерческой ценностью разработки, а не только ее ресурс - эффективностью и высокотехнологичными свойствами, которые в начале разработки продукта бывает достаточно трудно оценить. Высокая коммерческая ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Эти моменты важно учитывать разработчикам, которые должны представлять высокие перспективы проводимых научных исследований.

Таким образом, целью работы является проведение таких научных исследований, тема которых актуальна на сегодняшний день и отвечает современным требованиям в области ресурсосбережения и ресурсоэффективности.

Достижение цели обеспечивается решением ряда задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования;
- планирование научно-исследовательской работы;
- определение возможных альтернатив проведения научного исследования, отвечающих современным требованиям в области ресурсосбережения и ресурсоэффективности.

4.1 Календарный план работ и оценка времени их выполнения

Для выполнения исследований по данной работе создана рабочая группа, состоящая из руководителя и студента. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Был составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, а также распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.1. В таблице 4.2 представлен

календарный план выполнения работ.

Таблица 4.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя	Продолжительность, дни
Разработка и выдача технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	1
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер	1
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	1
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	25
	6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	55
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер	3
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, Инженер	5
	9	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель, инженер	1
Разработка технической документации и проектирование	10	Разработка стенда для выполнения проекта	Инженер	2
	11	Выбор и расчет стенда	Инженер	2
	12	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3
	13	Лабораторные испытания макета	Инженер	11
Оформление комплекта документации по ВКР	14	Составление пояснительной записки	Инженер	33
	15	Проверка пояснительной записки	Руководитель, инженер	4

Таблица 4.2 – Календарный план

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Декабрь		Январь				Март						
				15	16	4	5	6	29	8	13	17	18	20	22	25
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	1													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20													
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	1													
4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	1													
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	25													
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	55													
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер	3													
8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер	5													
9	Определение целесообразности проведения ВКР	Научный руководитель, инженер	1													

Продолжение таблицы 4.2 – Календарный план-график проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Декабрь		Январь				Март						
				15	16	4	5	6	29	8	13	17	18	20	22	25
10	Разработка стенда для выполнения проекта	Инженер	2													
11	Выбор и расчет стенда	Инженер	2													
12	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3													

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ					
				март		апрель		Май	
				25	26	3	12	12	13
13	Лабораторные испытания макета	Инженер	11						
14	Составление пояснительной записки	Инженер	33						
15	Проверка пояснительной записки	Научный руководитель, инженер	4						

Научный руководитель -

Инженер -

Таким образом, был оценен объем необходимых работ, составлен календарный план их проведения и распределены обязанности участников проекта: участниками являются 2 человека - научный руководитель и инженер. Научный руководитель участвует в работе в течении 13 дней, инженер- 167 дней.

4.2 Смета затрат на проект

Затраты на выполнения проекта ($K_{пр}$) складываются из следующих составляющих:

$$K_{пр} = K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о.} + K_{пр} + K_{накл},$$

где $K_{мат}$ – материальные затраты на выполнение проекта;

$K_{ам}$ – амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$ – затраты на заработную плату;

$K_{с.о.}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные расходы.

4.2.1 Материальные затраты

Материальные затраты принимаем в размере 2200 рублей на канцелярские товары.

4.2.2 Амортизация компьютерной техники

Рассчитаем амортизацию компьютерной техники $K_{ам}$:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot C_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}},$$

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

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

$C_{кт}$ – цена компьютерной техники;

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

Затраты и время работы компьютерной техники сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Стоимость и время работы компьютерного оборудования

Объект	Стоимость, руб.	Время использования, дней.
Компьютер	65000	87

Тогда амортизация составит

$$K_{\text{ам.компьютера}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{87}{365} \cdot 65000 \cdot \frac{1}{5} = 3099 \text{ руб};$$

$$K_{\text{ам}} = K_{\text{ам.компьютера}} = 3099 \text{ руб.}$$

4.2.3 Затраты на заработную плату

Заработная плата рассчитывается для инженера и научного руководителя:

$$K_{\text{з/пл}} = ЗП_{\text{инж}} + ЗП_{\text{нр}}$$

где $ЗП_{\text{инж}}$ – заработная плата инженера;

$ЗП_{\text{нр}}$ – заработная плата научного руководителя.

Заработная плата за месяц:

$$ЗП_{\text{мес}} = ЗП_0 \cdot k_1 \cdot k_2,$$

где $ЗП_0$ – месячный оклад, руб;

k_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (10%);

k_2 – районный коэффициент (30%).

Заработная плата научного инженера (10 разряд):

$$ЗП_{\text{инж}} = ЗП_0 \cdot k_1 \cdot k_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб},$$

Заработная плата научного руководителя (15 разряд):

$$ЗП_{\text{мес}} = ЗП_0 \cdot k_1 \cdot k_2 = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб},$$

Рассчитаем заработную плату за количество отработанных дней по факту:

$$ЗП_{\text{инж.фак.}} = \frac{ЗП_{\text{нр}}}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 167 = 193322 \text{ руб},$$

$$ЗП_{\text{нр.фак.}} = \frac{ЗП_{\text{нр}}}{21} \cdot n = \frac{37609}{21} \cdot 13 = 23282 \text{ руб.}$$

где n – фактическое число дней работы в проекте.

В итоге затраты на оплату труда руководителя ВКР и инженера составят:

$$K_{з/пл} = 3П_{инж.фак.} + 3П_{пр.фак.} = 193322 + 23282 = 216604 \text{руб.}$$

4.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные отчисления составляют 30% от $K_{з/пл}$ и равны:

$$K_{с.о.} = K_{з/пл} \cdot 0,3 = 216604 \cdot 0,3 = 64981 \text{руб.}$$

4.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаем в размере 10% от суммы материальных и амортизационных затрат, затрат на заработную плату, а также затрат на социальные отчисления:

$$\begin{aligned} K_{пр} &= (K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о.}) \cdot 0,1 \\ &= (2200 + 3099 + 216604 + 64981) \cdot 0,1 = 28688 \text{руб.} \end{aligned}$$

4.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы принимаем в размере 200% от затрат на заработную плату $K_{з/пл}$:

$$K_{накл} = K_{з/пл} \cdot 2 = 216604 \cdot 2 = 433208 \text{руб.}$$

Составим итоговую смету затрат на выполнения проекта:

Таблица 4.4 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	2200
Амортизационные затраты	3099
Затраты на заработную плату	216604
Социальные отчисления	64981
Прочие затраты	28688
Накладные расходы	433208
Итого:	748780

4.3 Смета затрат на материалы для реализации проекта

В таблице 4.5 представлено подробное описание расходов на материалы, необходимые для реализации проекта:

Таблица 4.5 – Расходы на материалы

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
Канцелярские товары	-	-	-	2200
Двигатель	Шт.	700	6	4200
Электронный микроконтроллер скорости	Шт.	300	6	1800
Полётный контроллер	Шт.	4000	1	4000
Аккумулятор	Шт.	2400	1	2400
Ходовая часть	Шт.	3200	1	3200
Крыло	Шт.	80	6	480
Пульт управления	Шт.	2700	1	2700
Итого:				20980

В ходе исследования был изучен состав, принципы работы двигателя и электронного микроконтроллера скорости БПЛА 700AL-X6. Создана на основании дифференциальных уравнений модель двигателя в MATLAB/SIMULINK. Получены передаточные функции двигателя по напряжению и по возмущающему фактору, определены показатели качества по переходному процессу, по частотным характеристикам. Оценена точность работы двигателя.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Представление о понятии «Социальная ответственность» будущий специалист может получить из международного стандарта IC CSR-08260008000:2011 «Социальная ответственность организации. Требования» [14], который был утвержден и введен в действие Международным Комитетом по корпоративной социальной ответственности (IC CSR), протокол №2 от 03 марта 2011 г.

В настоящем стандарте используются термины и определения, такие как: социальная ответственность (social responsibility) – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях.

Научно-исследовательская работа выполнялась в помещении, далее офис, находящемся на кафедре «Автоматики и компьютерных систем», десятого корпуса Томского Политехнического Университета, в аудитории 117а. Площадь, приходящаяся на одно рабочее место пользователя ПК с ЭЛТ-монитором должна составлять не менее 6 м², с монитором на базе плоских дискретных экранов – 4,5 м², что позволяет расположить технические средства на безопасном расстоянии до пользователя.

Для данной рабочей зоны необходимо проанализировать следующие факторы. К вредным факторам относятся: микроклимат, шум, электромагнитные поля, освещение.

К опасным факторам рабочей зоны относятся: опасность возникновения пожара и опасность поражения электрическим током.

Чрезвычайные ситуации характерные для данного объекта: пожар.

Вопросы, относящиеся к организации и охране труда при работе за компьютером, регулируются:

- Трудовым кодексом Российской Федерации,
- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»,
- Инструкцией по охране труда при работе на ПК.

5.1 Техногенная безопасность

5.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды

Микроклимат рабочего помещения

Микроклимат рабочих помещений – климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также интенсивности теплового излучения от нагретых поверхностей [24].

Мероприятия по доведению микроклиматических показателей до нормативных значений включаются в комплексные планы предприятий по охране труда. Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения (таблицы 5.1–5.2) [15]. Выполняемая работа относится к категории легкая (1б).

Таблица 5.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21 - 23	20 – 24	60-40	0,1
Теплый	23-25	22-26	60-40	0,1

Таблица 5.2 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	19,0 - 20,9	23,1 - 24,0	18,0 - 25,0	15 - 75	0,1	0,2
Теплый	20,0 - 21,9	24,1 - 28,0	19,0 - 29,0	15 - 75	0,1	0,3

В данном случае температура воздуха и температура поверхностей составляют 21⁰С и 20⁰С при относительной влажности 50% в холодный период года; 24⁰С и 23⁰С при относительной влажности воздуха 55% в теплый период года, что соответствует нормам СанПиН 2.2.4.548-96.

Производственные шумы

Шум – это совокупность различных звуков, возникающих в процессе производства и неблагоприятно воздействующих на организм [18].

Шум может привести к нарушениям слуха (в случае постоянного нахождения при шуме более 85 децибел(dB)), может являться фактором стресса и повысить систолическое кровяное давление.

Дополнительно, он может способствовать несчастным случаям, маскируя предупреждающие сигналы и мешая сконцентрироваться.

Для рассматриваемого помещения основными источниками шума являются персональные компьютеры, кондиционер и вытяжные вентиляторы на окнах.

Нормативным документом, регламентирующим уровни шума для различных категорий рабочих мест служебных помещений, является ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» [18].

Помещения, в которых для работы используются ПК не должны граничить с помещениями, в которых уровни шума превышают нормируемые значения.

В помещениях, оборудованных ПК, которые являются основным источником шума при выполнении данных видов работ, уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА [20].

5.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды

Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного для жизни воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [21].

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока и электрической дуги проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Помещение, где расположены персональные вычислительные машины, относится к помещениям без повышенной опасности [24], так как отсутствуют следующие факторы:

- сырость;
- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы;
- высокая температура;
- возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землёй металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам и механизмам и металлическим корпусам электрооборудования.

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током следует отнести [22]:

- при производстве монтажных работ необходимо использовать только исправный инструмент, аттестованный службой КИПиА;

- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов должны быть заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- необходимо постоянно следить за исправностью электропроводки.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления приэкранного фильтра.

Токи статического электричества, наведенные в процессе работы компьютера на корпусах монитора, системного блока и клавиатуры, могут приводить к разрядам при прикосновении к этим элементам. Такие разряды опасности для человека не представляют, но могут привести к выходу из строя компьютера. Для снижения величин токов статического электричества используются нейтрализаторы, местное и общее увлажнение воздуха, использование покрытия полов с антистатической пропиткой.

Пожарная безопасность

Пожарная безопасность — комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара [23].

Рабочее помещение, в котором производится работа по выполнению ВКР по пожарной и взрывной опасности относят к категории В.

К противопожарным мероприятиям в помещении относят следующие мероприятия:

1) помещение должно быть оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем); средствами связи; должна быть исправна электрическая проводка осветительных приборов и электрооборудования.

2) каждый сотрудник должен знать место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнить номера телефонов для сообщения о пожаре; уметь пользоваться средствами пожаротушения.

Помещение обеспечено средствами пожаротушения в соответствии с нормами [24]:

1) пенный огнетушитель ОП-10 – 1 шт.

2) углекислотный огнетушитель ОУ-5 – 1 шт.

При невозможности самостоятельно потушить пожар необходимо вызвать пожарную команду, после чего поставить в известность о случившемся инженера по техники безопасности.

Вынужденная эвакуация при пожаре протекает в условиях нарастающего действия опасных факторов пожара. Кратковременность процесса вынужденной эвакуации достигается устройством эвакуационных путей и выходов, число, размеры и конструктивно-планировочные решения которых регламентированы строительными нормами СНиП 2.01.02-85.

Помещение и этаж оборудованы следующими средствами оповещения:

- световая индикация в коридорах этажа;
- звуковая индикация в виде громкоговорителя;
- пассивными датчиками задымленности.

5.2 Региональная безопасность

Региональная безопасность - это состояние, при котором в регионе защищены региональные интересы в широком их понимании, включающем политические, социальные, экономические, военные, экологические аспекты, риски, связанные с внешнеэкономической деятельностью, распространением оружия массового поражения, а также предотвращения угрозы духовным и интеллектуальным ценностям населения региона.

На сегодняшний день одним из самых распространенных источников ртутного загрязнения являются вышедшие из эксплуатации люминесцентные лампы. Каждая такая лампа, кроме стекла и алюминия, содержит около 60 мг ртути. Поэтому отслужившие свой срок люминесцентные лампы, а также другие приборы, содержащие ртуть, представляют собой опасный источник токсичных веществ.

В целом, утилизация ламп предполагает передачу использованных ламп предприятиям – переработчикам, которые с помощью специального оборудования перерабатывают вредные лампы в безвредное сырье – сорбент, которое в последующем используют в качестве материала для производства, например, тротуарной плитки.

Под хранением отходов понимается временное размещение их в специально отведенных для этого местах или объектах до их утилизации. Отработанные люминесцентные лампы, согласно Классификатору отходов ДК 005-96, утвержденному приказом Госстандарта № 89 от 29.02.96 г., относятся к отходам, которые сортируются и собираются отдельно, поэтому утилизация люминесцентных ламп и их хранение должны отвечать определенные требованиям [26].

5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности

Требования к организации рабочих мест пользователей:

- Рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [27] и ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам» [28];
- Конструкция рабочей мебели (рабочий стол, кресло, подставка для ног) должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки соответственно росту пользователя и создавать удобную позу для работы. Вокруг ПК должно быть обеспечено свободное пространство не менее 60-120см;
- На уровне экрана должен быть установлен оригинал-держатель.

На рисунке 5.1. представлены требования к рабочему месту.

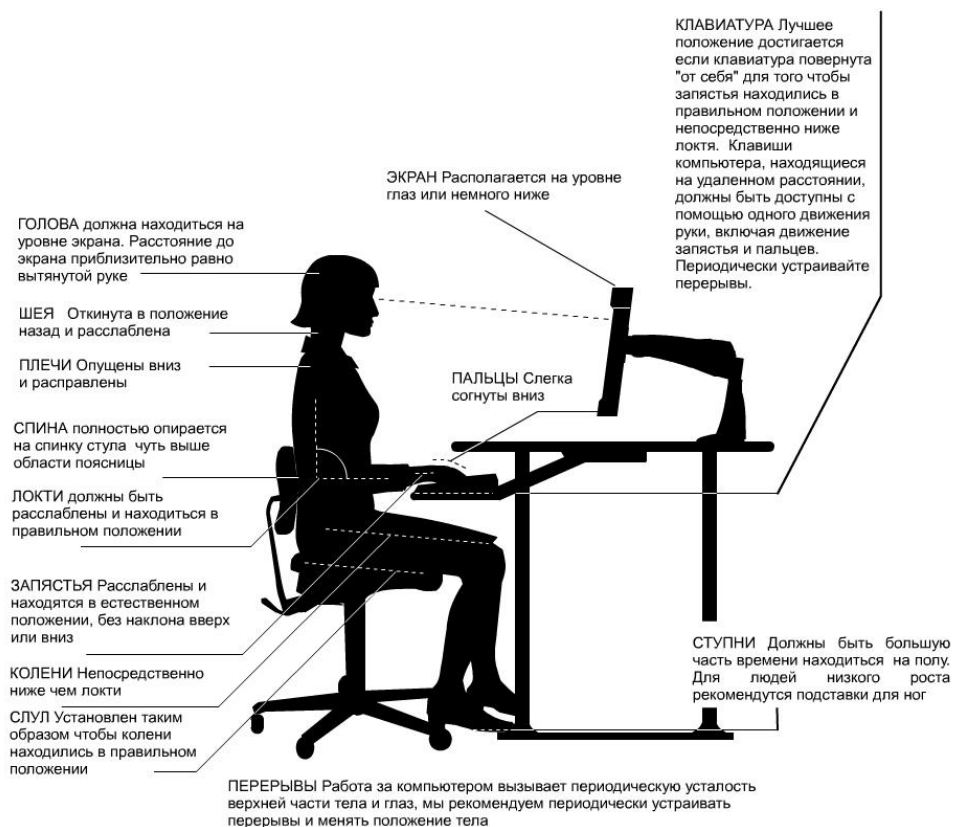


Рисунок 5.1 – Организация рабочего места

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.

Обязательно предусмотрен предварительный медосмотр при приеме на работу и периодические медосмотры.

Каждый сотрудник должен пройти инструктаж по технике безопасности перед приемом на работу и в дальнейшем, должен быть пройден инструктаж по электробезопасности и охране труда.

5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений

При реализации данного технологического решения, представленного в ВКР, был разработан комплекс мер по обеспечению безопасности труда при работе на данном объекте. При разработке данных мер были использованы следующие нормативные документы:

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»;

СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;

ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности»;

4) СНиП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы»;

5) ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам»;

6) ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»

5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном случае на объекте (офис) могут возникать чрезвычайные ситуации (ЧС) следующего характера:

- техногенные;
- экологические;
- природные.

Наиболее типичной ЧС для помещения, котором производится выполнение ВКР, является пожар. Данная ЧС может произойти в случае замыкания электропроводки оборудования, обрыву проводов, не соблюдению мер пожаробезопасности и т.д.

Для того чтобы избежать возникновения пожара необходимо проводить следующие профилактические работы, направленные на устранение возможных источников возникновения пожара:

- периодическая проверка проводки;

- отключение оборудования при покидании рабочего места;
- проведение инструктажа работников о пожаробезопасности.

Чтобы увеличить устойчивость офисного помещения к ЧС необходимо устанавливать системы противопожарной сигнализации, реагирующие на дым и другие продукты горения, установка огнетушителей, обеспечить офис и проинструктировать рабочих о плане эвакуации из офиса, а также назначить ответственных за эти мероприятия. Два раза в год (в летний и зимний период) проводить учебные тревоги для отработки действий при пожаре. В ходе осмотра офисного помещения были выявлены системы, сигнализирующие о наличии пожара или задымленности помещения и наличие огнетушителей.

В случае возникновения ЧС как пожар, необходимо предпринять меры по эвакуации персонала из офисного помещения в соответствии с планом эвакуации (рисунок 5.2). При отсутствии прямых угроз здоровью и жизни произвести попытку тушения возникшего возгорания огнетушителем. В случае потери контроля над пожаром, необходимо эвакуироваться вслед за сотрудниками по плану эвакуации и ждать приезда специалистов, пожарников. При возникновении пожара должна сработать система пожаротушения, издав предупредительные сигналы, и передав на пункт пожарной станции сигнал о ЧС, в случае если система не сработала, по каким-либо причинам, необходимо самостоятельно произвести вызов пожарной службы по телефону 101, сообщить место возникновения ЧС и ожидать приезда специалистов.

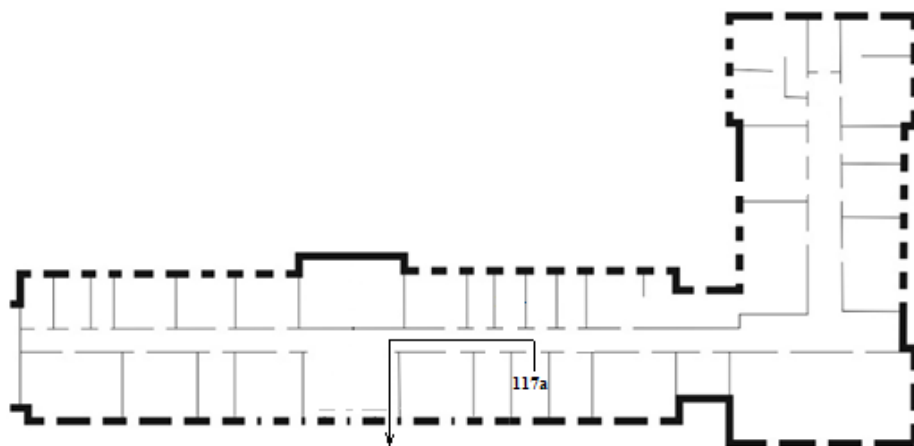


Рисунок 5.2 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса № 10, пр. Ленина, 1 этаж

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе был изучен состав и принципы работы гексакоптера. Используя уравнения электрического равновесия якорной цепи и уравнения движения двигателя, получена модель ДПТ в MATLAB/Simulink. По данной модели были получены графики переходного процесса, определены показатели качества регулирования ДПТ. Кроме того, данная модель позволила получить передаточные функции ДПТ по напряжению якорной цепи и моменту сопротивления; построить графики переходного процесса; оценить показатели качества и определить ошибки регулирования двигателя. Показатели, полученные по модели и передаточной функции хорошо совпадают.

На основании принципа действия бесколлектного ДПТ и назначении элементов и устройств, входящих в гексакоптер, созданы модели регулятора скорости, тока сравнения, контроля гистерезиса тока, преобразователя напряжения. По предложенным моделям получены графики токов обмоток, ЭДС, электромагнитного момента, положения и скорости вращения ротора.

На основании совокупности моделей устройств мультикоптера предложена имитационная модель, которая в дальнейшем позволит управлять процессами полёта БПЛА.

CONCLUSION

In the graduation qualification work, the composition and principles of the hexacopter operation were studied. Using the equations of the electric equilibrium of the anchor chain and the equation of motion of the engine, a DC motor model is obtained in MATLAB / Simulink. According to this model, transient graphs were obtained, and indicators of the quality of DC motor regulation were determined. In addition, this model allowed to obtain brushless DC motor transfer functions for the anchor circuit voltage and the moment of resistance; Build transient graphs; To evaluate the quality indicators and determine the engine control points. The indicators obtained by the model and the transfer function are in good agreement.

On the basis of the principle of the action of the brushless DC motor and the designation of elements and devices that go into the hexacopter, models of a speed controller, a comparison current, a current hysteresis control, a voltage converter are created. According to the proposed model, the graphs of the currents of windings, EMF, electromagnetic moment, position and speed of rotation of the rotor are obtained.

On the basis of the set of models of the multi-copter device, an imitation model is proposed, which will allow controlling the flight processes of the UAV in the long run.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. БПЛА // Википедия
2. Электрический градус [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 03.04.2017г
3. Широтно-импульсная модуляция [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 14.04.2017г
4. MOSFET [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 10.04.2017 г
5. Характеристики бесколлекторного двигателя постоянного тока [Электронный ресурс] URL: <http://www.rcsunnysky.com/content/37.html> – Загл. с экрана – Яз. анг. Дата обращения: 10.04.2017 г
6. Принцип действие двигателя [Электронный ресурс] URL: <https://wenku.baidu.com/view/0926cd464a7302768f993919.html?pn=50> – Загл. с экрана – Яз. кит. Дата обращения: 05.04.2017 г
7. Характеристики электронного контроллера скорости [Электронный ресурс] URL: <http://www.hobbywing.com/cn/goodsshow.php?id=407> – Загл. с экрана – Яз. кит. Дата обращения: 10.04.2017 г
8. Принцип действие электронного микроконтроллера скорости [Электронный ресурс] URL: <http://forum.rcdesign.ru/f123/thread255499.html> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 05.05.2017 г
9. Параметры двигателя [Электронный ресурс] URL: <https://www.zybang.com/question/728d7e5be464583d6ce1bb6165c446e0.html> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 05.04.2017 г
10. Передаточная функция двигателя постоянного тока [Электронный ресурс] URL: <https://refdb.ru/look/2066781.html> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 11.05.2017 г

11. Моделирование запуска двигателя [Электронный ресурс] URL: <https://wenku.baidu.com/view/59ac5cd33186bceb19e8bb6a.html> – Загл. с экрана – Яз. кит. Дата обращения: 04.04.2017 г
12. Модель бесколлекторного двигателя постоянного тока [Электронный ресурс] URL: <http://blog.csdn.net/u014170067/article/details/54024462> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 07.04.2017 г
13. Контроль гистерезиса тока [Электронный ресурс] URL: <http://www.doc88.com/p-1716977033809.html> – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата обращения: 17.05.2012 г
14. «Автоматизированное проектирование средств и систем управления». Е. М. Яковлева. 2016г.
15. Международный стандарт «Социальная ответственность организации. Требования». 2011.
16. СанПиН 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
17. СНиП 23-05-95. «Естественное и искусственное освещение».
18. Назаренко, Ольга Брониславовна. Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 3-е изд., перераб. и доп. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 177 с
19. ГОСТ 12.1.003-83. «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности».
20. СанПиН 2.2.4.1191-03. «Электромагнитные поля в производственных условиях».
21. СанПиН 2.2.4.1340-03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
22. ГОСТ 12.1.009-76. «Электробезопасность. Термины и определения»
23. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
24. СНиП 21-01-97. «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

25. НПБ 105-2003. «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

26. ГОСТ 17.4.3.04-85. «Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения».

27. СанПиН 2.1.7.2790-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к обращению с медицинскими отходами».

28. ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».

29. ГОСТ 12.2.061-81. «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам»