

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

Институт Энергетический институт
Направление подготовки - 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Контрольно-проверочная аппаратура для испытаний синхронных двигателей с электромагнитной редукцией

УДК: 620.1.05:621.313.323

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Марков Михаил Дмитриевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех А.И.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	д.т.н, профессор		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4,5; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2,3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Иметь представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии отрасли, навыки проведения работ с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС ВО (УК-5, ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
По профилям подготовки		
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, 7,8), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)

P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС ВО (ПК-2, 9, 10, 11), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EU-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Гарганеев А.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Маркову Михаилу Дмитриевичу

Тема работы:

Многокоординатный прецизионный позиционер на базе сервоприводов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.02.2020 № 58-29/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Моделирование, разработка и реализация контрольно-проверочного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукицией. Проведение моделирования с получением характеристик модели двигателя. Проведение испытаний на реализованном испытательном стенде с реальным двигателем. Выделенный испытываемый объект – двухфазный шаговый двигатель 14Ф151.3413-0.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Титульный лист Задание Реферат Оглавление Введение Раздел 1. Назначение стендов Раздел 2. Испытания синхронных двигателей с электромагнитной редукцией Раздел 3. Принцип управления синхронного двигателя с электромагнитной редукцией Раздел 4. Имитационная модель КПА ЭД Раздел 5. Макетирование БУ КПА ЭД Раздел 6. Разработка программного обеспечения Раздел 7. Управление СДЭР Раздел 8. Разработка программных защит Раздел 9. Технико-экономическое обоснование выбора компонентов БУ КПА ЭД Раздел 10. Разработка вспомогательных функций встроенного программного обеспечения Раздел 11. Разработка механического стенда Раздел 12. Разработка внутреннего ПО для КПА ЭД Раздел 13. Проведение испытания КПА ЭД Раздел 14. Корректировка алгоритмов управления Раздел 15. Проведение испытаний при помощи разработанного макета Заключение Список используемой литературы</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>- имитационные модели электропривода - графики переходных процессов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(если необходимо, с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основное исследование</p>	<p>Каракулов Александр Сергеевич</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Фех Алина Ильдаровна</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Спицына Любовь Юрьевна</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Качалов Николай Александрович</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</p>	
<p>Обзор на аутентичную литературу по теме «Контрольно-проверочная аппаратура для испытаний синхронных двигателей с электромагнитной редукцией»</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>01.02.2020 г.</p>
--	----------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов Александр Сергеевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Марков Михаил Дмитриевич		

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения осенний/ весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2020	Календарное планирование работ по теме	3
12.03.2020	Описание объекта исследования	3
20.03.2020	Подбор и изучение материалов по теме	3
22.03.2020	Составление и утверждение технического задания	3
28.03.2020	Разработка модели и алгоритма работы выбранного оборудования	3
11.04.2020	Разработка контрольно-проверочного оборудования	6
15.04.2020	Проведение испытаний и анализ полученных данных	3
25.04.2020	Контроль качества выполнения проекта и консультирование студента	3
02.05.2020	Оценка эффективности проделанной работы	3
10.05.2020	Технико-экономические расчеты	3
12.05.2020	Вопросы экологической безопасности	3
15.05.2020	Составление пояснительной записки	4
22.05.2020	Итог	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	профессор д.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Маркову Михаилу Дмитриевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Электропривод общепромышленных механизмов и технологических комплексов

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оклад руководителя - 27484 руб. Инженера - 17808 руб. Предельный объем бюджета НИИ не более 3300000 рублей, в том числе затраты на оплату труда не более 2400000 рублей.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	14 % материальные расходы 80 % расходы на оплату труда 14% накладные расходы 30% районный коэффициент Значение показателя интегральной ресурсо-эффективности не менее 4,7 баллов из 5
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	30% отчисления на социальные нужды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Анализ конкурентных решений доказывает целесообразность проведения разработки
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Структура научно-технического проекта
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составлен план проекта для выполнения целесообразного и рационального планирования
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	SWOT-анализ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НИИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НИИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ
8. Потенциальные риски

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Марков Михаил Дмитриевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Маркову Михаилу Дмитриевичу

Школа		Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электропривод общепромышленных механизмов и технологических комплексов

Тема ВКР:

Контрольно-проверочная аппаратура для испытаний синхронных двигателей с электромагнитной редукицией	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Объект исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Работа посвящена вопросам разработки и исследования испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукицией.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); - ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»; – СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий; – ГОСТ 12.2.061-81 «Общие требования безопасности к рабочим местам»; – ГОСТ 12.4.011 – 89 ССБТ. Средства защиты работающих.
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Выявленные вредные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> — недостаток естественного света — отклонение показателей микроклимата <p><i>Выявленные опасные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> — поражение электрическим током;

	<ul style="list-style-type: none"> — опасность получения механических травм отдвигающихся элементов электропривода; — опасность возгорания.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> — вредные выбросы в атмосферу, — вредные выбросы в литосферу, — вредные выбросы в гидросферу
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее вероятные ЧС в здании в момент проведения исследования – пожар и поражение электрическим током;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.02.2020г.
---	---------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех Алина Ильдаровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Марков Михаил Дмитриевич		.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 169 с., 56 рисунков, 37 таблиц, 11 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель с электромагнитной редукцией, контрольно-проверочная аппаратура, постоянные магниты, система управления, блок управления, испытательный стенд, динамические характеристики, математическая модель.

Объектом исследования является контрольно-проверочная аппаратура для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией.

Цель работы – разработка имитационной модели электропривода с синхронным двигателем с электромагнитной редукцией, разработка и проектирование испытательной системы для определения статических и динамических характеристик исследуемого двигателя.

В процессе исследования проводился обзор литературы связанной с тематикой исследования, были разобраны типы испытательных стендов, режимы работы для двухфазных двигателей, разработана система реализации управляющих сигналов, произведено математическое моделирование электропривода с шаговым двухфазным двигателем и настройка регуляторов системы, было произведено макетирование блока управления и механического стенда, разработано программное обеспечение для осуществления управления контрольно-проверочным оборудованием, также были проведены эксперименты на оборудовании.

Проведена проверка безопасности и экологичности проекта, также рассчитана экономическая эффективность проведенной работы.

Объектом исследования работы является контрольно-проверочная аппаратура синхронного двигателя с электромагнитной редукцией.

Предметом исследования являются цифровые системы управления синхронных двигателей с электромагнитной редукцией.

Методы исследования. Для выполнения поставленной цели применялся практический метод исследования. Практическое исследование основано на натурных испытаниях оборудования с осциллографированием результатов экспериментов.

Практическая значимость результатов ВКР. **Данная разработка применяется для реализации опытно-конструкторской работы по разработке и созданию контрольно-проверочной аппаратуры для изготовления электродвигателей каналов СНА, УПС и механических устройств БК УПФР. Заказчиком данного проекта является акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (АО «ИСС»).**

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2019. Расчеты произведены в программной среде MathCAD 2015. Имитационное моделирование выполнялось при помощи программного обеспечения Simulink/MATLAB R2019a. Моделирование выполнено с использованием программного обеспечения MexBIOS Development Studio v7.18.0.0.

Оглавление

Введение.....	12
1. Назначение стендов	13
2. Испытания синхронных двигателей с электромагнитной редукцией	18
3. Принцип управления синхронного двигателя с электромагнитной редукцией	20
4. Имитационная модель КПА ЭД	25
5. Макетирование БУ КПА ЭД	39
6. Разработка программного обеспечения	43
7. Управление СДЭР	46
8. Разработка программных защит	50
9. Техничко–экономическое обоснование выбора компонентов БУ КПА ЭД	52
10. Разработка вспомогательных функций встроенного программного обеспечения	60
11. Разработка механического стенда	64
12. Разработка внутреннего ПО для КПА ЭД	70
13. Проведение испытания КПА ЭД	72
14. Корректировка алгоритмов управления	83
15. Проведение испытаний при помощи разработанного макета	86
16. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	89
17. Социальная ответственность	128
Заключение	149
Список используемой литературы	151
Приложение I.....	153

Введение

Настоящая работа посвящена исследованию динамических характеристик синхронного двигателя с электромагнитной редукцией. Здесь описываются исследования характеристик при различных формах токов в обмотках двигателя, при различных частотах и нагрузках. Исследование сопровождается разработкой специального контрольно-проверочного оборудования, необходимого для подтверждения исследуемых параметров.

Исследования проводятся при помощи математической имитационной модели электропривода с шаговым двигателем в математическом аппарате Matlab. При проведении исследований производится поиск и установление точек, которые определяют максимально возможные механические и электромеханические характеристики двигателя.

После получения результатов моделирования необходимо подтвердить значения при помощи проведения испытаний на макетном образце. Разрабатывается макет испытательной аппаратуры, способный управлять синхронным двигателем с электромагнитной редукцией с учетом различных форм токов, задать различную частоту и амплитуду токов. Данное испытательное оборудование должно иметь возможность устанавливать статический момент нагрузки, а также изменять момент инерции на валу двигателя. При проведении испытаний, данное оборудование должно иметь возможность измерять механический момент на валу, а также скорость вращения вала испытываемого двигателя.

Исследования, моделирование, разработка и испытания проводятся на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ в рамках выполнения государственного оборонного заказа согласно договору №1120187311701010128000310/711/161-15 от 01.11.15, где заказчиком выступает АО «ИСС».

1. Назначение стендов

В настоящее время развитие технологий и производственных мощностей достигло того уровня, при котором производство синхронных двигателей с электромагнитной редукцией (далее – СДЭР) стало доступно в промышленных объемах. Данные двигатели разрабатываются для различных отраслей, в том числе и для таких ответственных, как космическая отрасль, военная или медицинская. При разработке таких двигателей учитываются различные статические и динамические характеристики при различных режимах работы.

Синхронный двигатель с электромагнитной редукцией (СДЭР) – это электромеханическое устройство, преобразующее сигнал управления в угловое (или линейное) перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении. Можно выделить три основных типа СДЭР: с переменным магнитным сопротивлением, с постоянными магнитами и гибридные.

СДЭР двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока, которые имеют высокую надёжность и большой срок службы, что позволяет использовать их в системах, работающих в тяжелых условиях [1].

СДЭР обладает следующими особенностями:

1. Минимальный угол шага. Двигатель поворачивается за каждый импульс управления на определённый фиксированный угол. Чем меньше шаг, тем большая частота вращения может быть достигнута [2,3].

2. Высокая точность частоты вращения. Конструкция двигателя предполагает, что за один импульс управления вал двигателя повернётся на определённый угол. Точность позиционирования зависит только от характеристик двигателя и инвертора, в то время как другие параметры схемы управления на неё не влияют [4].

3. Высокое отношение электромагнитного момента к моменту инерции. Момент инерции уменьшают, чтобы СДЭР в ответ на поступления входного импульса или последовательности импульсов двигался с максимальным ускорением. Требуется не только начало движения, но и быстрая остановка.

Существует ряд специализированного оборудования, предназначенного для испытания и подтверждения характеристик СДЭР. Испытательное оборудование электродвигателей, в зависимости от назначения, позволяет провести тестирование составных частей электродвигателя, либо комплексную проверку электродвигателя.

Разрабатываемый стенд должен обеспечивать:

- управление двухфазным и трехфазным синхронным двигателем во всех заданных режимах работы в реальном времени при проведении проверок;
- измерение основных технических характеристик;
- индикация на компьютере состояния об управляемом двигателе.

Система управления должна обеспечивать следующие режимы работы:

- микрошаговый режим управления (форма тока – синусоидальная) с заданным программными средствами коэффициентом электрического дробления конструктивного шага двигателя;
- режим 180-градусной коммутации (четырёхтактный режим);
- режим симметричной коммутации (четырёхтактный режим);
- режим несимметричной коммутации (восьмитактный режим);

Можно выделить следующие типы испытательных стендов для электродвигателей:

- Измерение сопротивления изоляции. Оценка состояния изоляции обмоток электродвигателей.
- Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.
- Проверка электродвигателя на холостом ходу или с ненагруженным механизмом.
- Проверка работы электродвигателя под нагрузкой.

и др.

Для испытания СДЭР существует необходимость в измерении частоты приемистости, определения нагрузочной характеристики двигателя.

Одним из наиболее важных факторов в измерительной аппаратуре является сцепление между валом двигателя и измерителем момента. Существуют три типичных устройства сцепления: с помощью резиновой втулки, сальфона и жесткая связь между валом и нагрузкой. Хорошие выходные характеристики в широком диапазоне шаговых частот вращения получают при использовании резинового сцепления, так как колебания ротора гасятся эластичной резиной, используемой для сцепления. Если же применяется жесткое или сальфонное сцепление, то после частоты следования импульсов управления 1200 Гц наступает внезапное снижение момента, который становится равным нулю при частоте около 1700 Гц. Эти ухудшения характеристик наступают, вероятно, из-за несовершенства механизма сцепления, который не обеспечивает демпфирования колебания ротора [5 с. 140].

Снятие нагрузочных характеристик предполагает наличие устройства создания момента сопротивления на валу двигателя. Момент сопротивления на валу можно создать с помощью механического тормоза, электромагнитного тормоза, нагрузочной нитью, источника момента. Рассмотрим достоинства и недостатки способов создания момента сопротивления.

Механический (фрикционный) тормоз не позволяет создать определённую желаемую величину нагрузки на испытуемый двигатель, его необходимо применять при исследовании двигателя на упор. Габариты механического тормоза для электродвигателей малой мощности сопоставимы с габаритами испытуемых двигателей. Также необходимо наличие возможности наложения механического тормоза на тормозную колодку двигателя.

Электромагнитный тормоз создаёт тормозной момент с помощью управляемых электромагнитов. Позволяет сформировать различные величины момента сопротивления. Но для подключения и наложения момента сопротивления необходимо на вал двигателя одевать дополнительный диск.

Испытательные стенды с тормозной нитью распространены и даже выпускаются иностранной промышленностью. Примером такого стенда является стенд японской фирмы SUGAWA SMT-2. Стенд позволяет снять всевозможные характеристики и провести испытание шагового двигателя, однако эксплуатация такого стенда связана с зависимостью от зарубежных поставщиков [6].

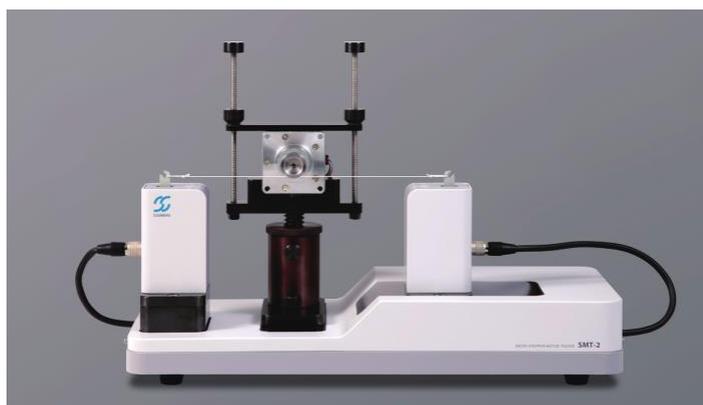


Рисунок 1.1. Внешний вид стенда

Торможение с помощью источника момента является наиболее предпочтительным в плане реализации. Источником момента может служить другой электрический двигатель. Источник момента позволяет сформировать

произвольный вид нагрузочной характеристики, произвести проверку работы во всех режимах работы электродвигателя.

К разрабатываемому стенду необходимо программное обеспечение верхнего уровня, которое позволит с компьютера управлять процессом проведения испытаний.

2. Испытания синхронных двигателей с электромагнитной редуccionей

Существуют различные методы измерений моментных характеристик, а также определение зависимости между формой момента, уравнением динамики и ускорением СДЭР [5].

Статические характеристики

T- θ характеристика и удерживающий момент. Исследуемый двигатель находится в стационарных условиях и запитывается нормированным током по определённой схеме возбуждения, например одно- или двухфазной. Положение ротора при отсутствии нагрузки есть равновесие или конечное положение. Измеряется зависимость между моментом, приложенным к валу, и отклонением от положения равновесия.

T-I характеристика показывает увеличение статического момента с увеличением тока. Для различных типов двигателей эта характеристика имеет различный вид. Момент у реактивного двигателя в отсутствие возбуждения равен нулю и при низких значениях тока возрастает в зависимости от него по параболе. При высоких значениях тока скорость нарастания момента не велика из-за магнитного насыщения сердечника. В гибридном или в двигателе с постоянными магнитами статический момент существует даже в отсутствие возбуждения и называется фиксирующим моментом. Зависимость T-I в гибридных двигателях и двигателях с постоянными магнитами близка к линейной.

Динамические характеристики

Для определения качества переходных процессов необходимо снять динамические характеристики в начале движения либо в конце.

Характеристики пускового момента определяются диапазоном значений момента сопротивления нагрузки, в котором двигатель может

запускаться и останавливаться без потери шага для различных частот в наборе импульсов (их около 100).

Зависимость между моментом сопротивления нагрузки и максимальной частотой импульсов управления, при которой сохраняется синхронизм, называется **выходной характеристикой**. Кривая выходной характеристики зависит от схемы управления, способа стыковки, измерительных приборов и других условий.

Максимальная частота приемистости определяется как максимальная управляющая частота, при которой ненагруженный двигатель может запускаться или останавливаться без пропуска шагов.

Максимальная выходная частота вращения определяется как максимальная (шаговая) частота вращения, при которой ненагруженный двигатель может двигаться без пропуска шагов.

Максимальный пусковой момент определяется как максимальный момент сопротивления нагрузки, с которой двигатель может запускаться и сохранять синхронности при наборе импульсов частотой до 10 Гц.

3. Принцип управления синхронного двигателя с электромагнитной редукцией

Существуют различные способы возбуждения СДЭР: однофазное возбуждение, двухфазный режим возбуждения, полушаговый режим возбуждения, возбуждение с помощью двухполупериодного (мостового) инвертора, управление малыми шагами [5, с 44].

Симметричный режим коммутации (также называется волновой последовательностью или *wave drive mode*) обеспечивается попеременной коммутацией фаз. При этом в каждый отдельный момент времени включена только одна фаза. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется 50% обмоток, а для униполярного – только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент [7].

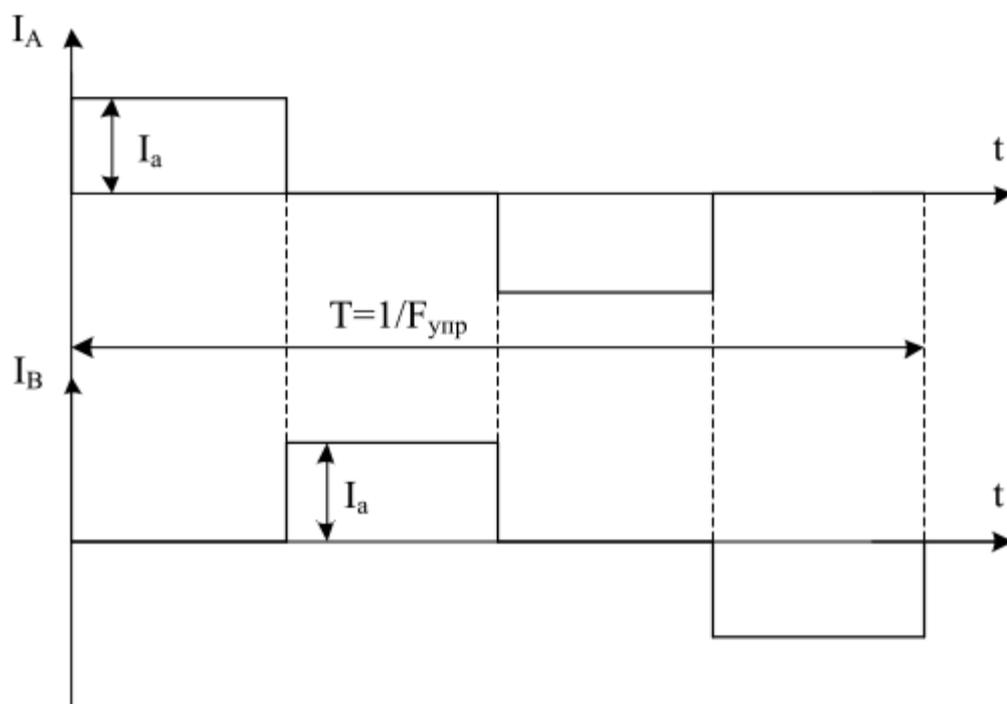


Рисунок 3.1. Режим симметричной коммутации

Режим 180-градусной коммутации или управление фазами с перекрытием предполагает работу двух фаз в одно и то же время. Также этот режим называют *full step mode*. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем при симметричной коммутации. Особенностью данного способа коммутации является сдвиг точки равновесия ротора на пол-шага. Это вызывает смещение при остановке. Чтобы избежать этого эффекта, необходимо подавать в обмотки ток удержания. Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется большого момента [8].

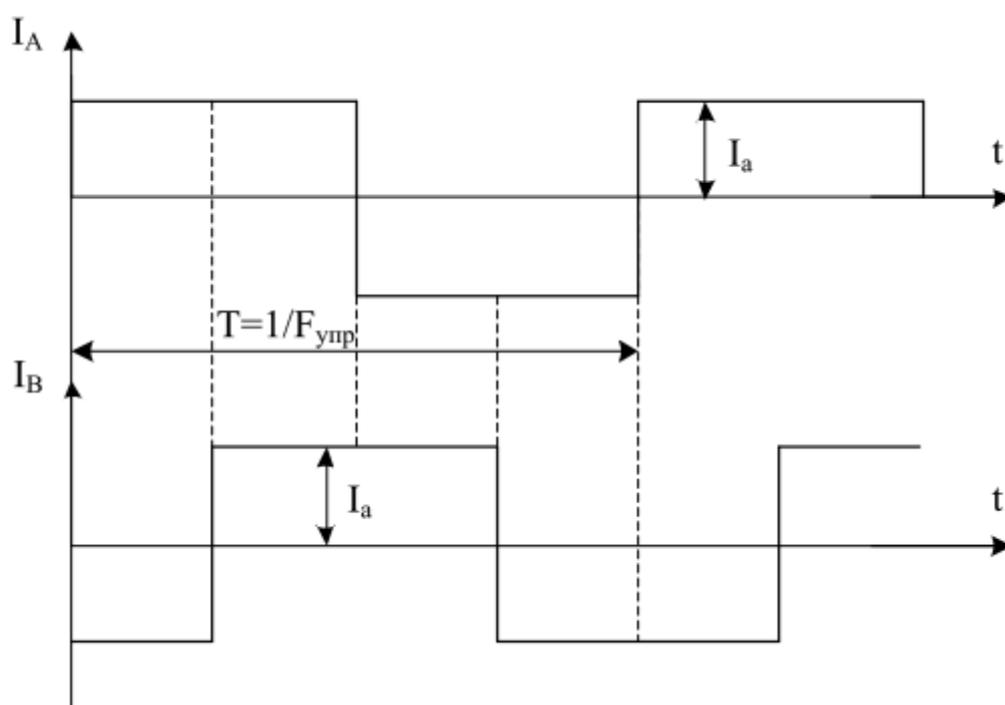


Рисунок 3.2. Режим 180-градусной коммутации

Несимметричный режим коммутации или полушаговый режим – комбинация двух предыдущих или *half step mode*. В этом режиме двигатель делает шаг в половину основного. Каждый второй шаг запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две. Данный режим позволяет частично избавиться от явления резонанса.

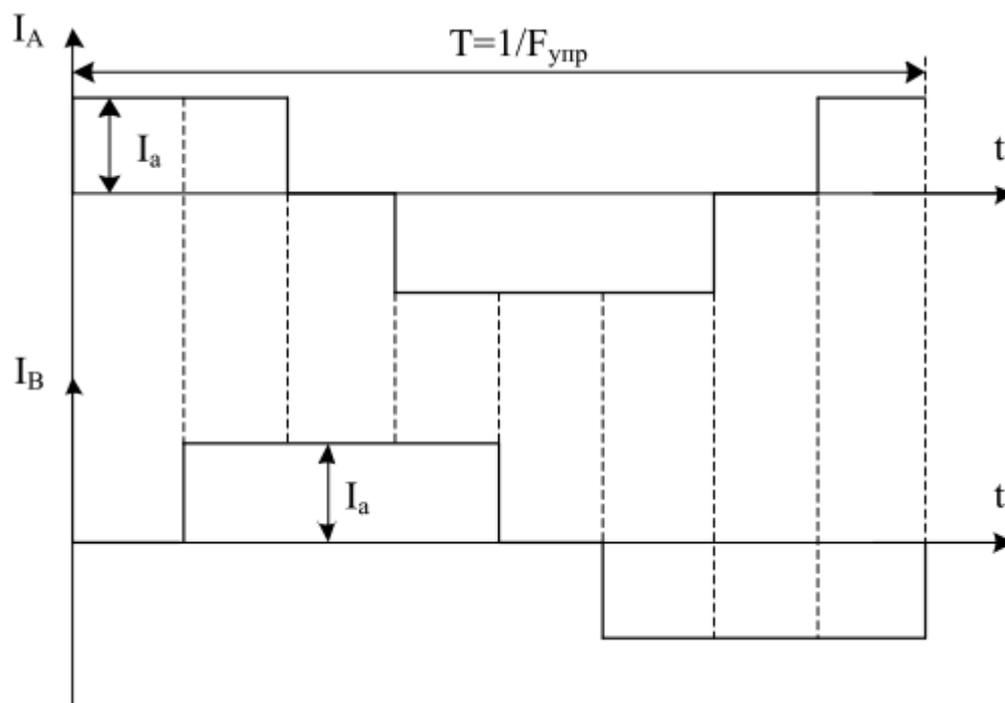


Рисунок 3.3. Режим несимметричной коммутации

С помощью инвертора напряжения можно разделить один шаг на множество малых шагов. Этот метод широко известен как **микрошаговое управление** и часто используется в гибридных СДЭР.

Для деления шага управляющему току придают шагово-волновую форму, как показано на рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Если один период разделить на $4n$ частей, то один шаг разделится на n подшагов. В результате обеспечиваются меньшие вибрации и практически бесшумная работа вплоть до нулевой частоты [9].

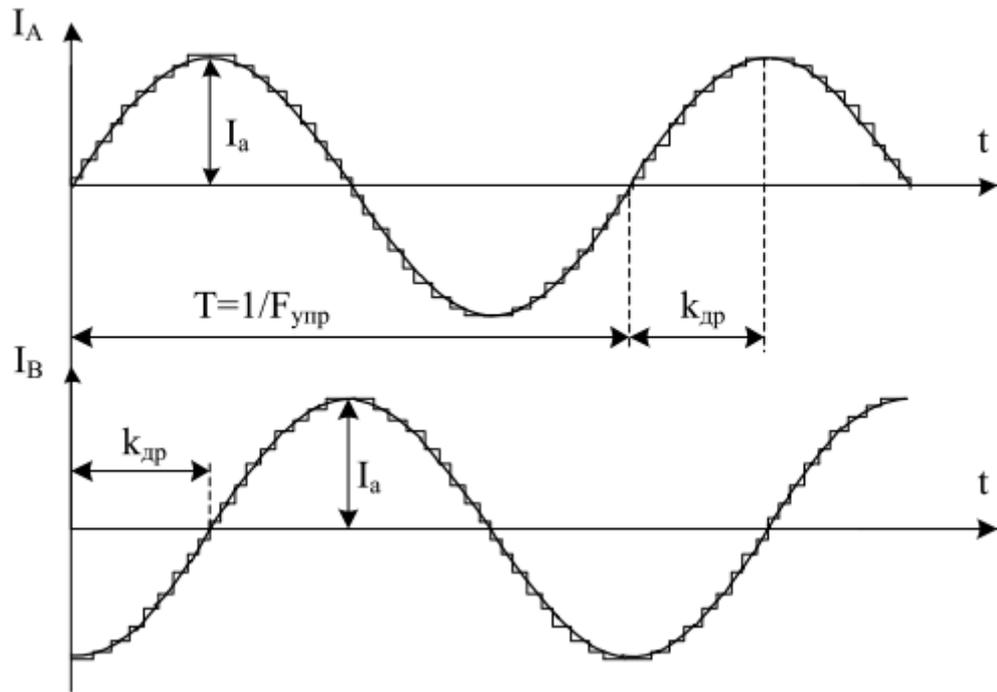


Рисунок 3.4. Форма тока при микрошаговом режиме управления

В микрошаговом режиме важно получить нужное направление магнитного поля, для этого необходимо выбрать не только правильное направление токов в катушках, но и правильное соотношение этих токов.

Если одновременно запитаны две обмотки двигателя, но токи в этих обмотках не равны, то результирующий момент будет $M_h = \sqrt{M_a^2 + M_b^2}$, а точка равновесия ротора сместится в точку

$$x = \frac{2\alpha}{\pi} \arctan\left(\frac{M_b}{M_a}\right)$$

где M_a и M_b - моменты, создаваемые первой и второй фазой соответственно, M_h - результирующий момент удержания, x - положение равновесия ротора в радианах, α - угол шага в радианах.

Приведённые формулы верны только в случае синусоидальной зависимости момента от угла поворота ротора и ни одна часть магнитной цепи двигателя не насыщена.

Микрошаговый режим целесообразно применять при низких частотах вращения. На частотах в 2-3 раза выше собственной резонансной частоты ротора и нагрузки, микрошаговый режим даёт не значительные преимущества по сравнению с полу- или полношаговыми режимами. Причиной этого является фильтрующее действие инерции ротора и нагрузки. Система с СДЭР работает подобно фильтру нижних частот. В микрошаговом режиме можно осуществлять только разгон и торможение, а основное время работать в полношаговом режиме. К тому же, для достижения высоких скоростей в микрошаговом режиме требуется очень высокая частота повторения микрошагов, которую не всегда может обеспечить управляющий микроконтроллер. Для предотвращения переходных процессов и потери шагов, переключения режимов работы двигателя (из микрошагового режима в полношаговый и т.п.) необходимо производить в те моменты, когда ротор находится в положении, соответствующем одной включенной фазе [1, с. 20].

4. Имитационная модель КПА ЭД

Имитационное моделирование позволяет ускорить процесс разработки готового устройства благодаря своей быстрой и наглядности. В рамках имитационного моделирования возможно провести проверку работоспособности исследуемой системы, произвести отладку программ необходимых для работы макета готового устройства. Результаты, полученные на этом этапе разработки позволяют подтвердить принципиальную возможность создания отвечающей требованиям системы управления.

Рассмотрим возможность формирования режимов работы, реализуемых в блоке управления (БУ) контрольно-проверочной аппаратуре электрических двигателей (КПА ЭД). Для этого произведем в среде MATLAB R2019a Simulink предварительное моделирование алгоритмов формирования токов фаз двигателя. В процессе моделирования работы устройства необходимо получить сигналы задания тока фаз, соответствующие диаграммам 180-градусного и микрошагового режимов управления.

Имитация задающих сигналов будет производиться при помощи стандартного блока S-Function Builder системы Simulink. Данный блок позволяет производить работу с программой, код которой реализован на стандартном языке программирования C.

Разработанный блок имеет три входящих переменных: Freq – частота сигнала, NDiv – дробление шага, IRef – задающий сигнал амплитуды тока. Среди выходных переменных в системе используются только две переменные – Ref1 и Ref2, являющиеся сигналами задания тока для обмотки А и В соответственно. Выходные сигналы Angle, Ramp1 и Ramp2 использовались в процессе отладки.

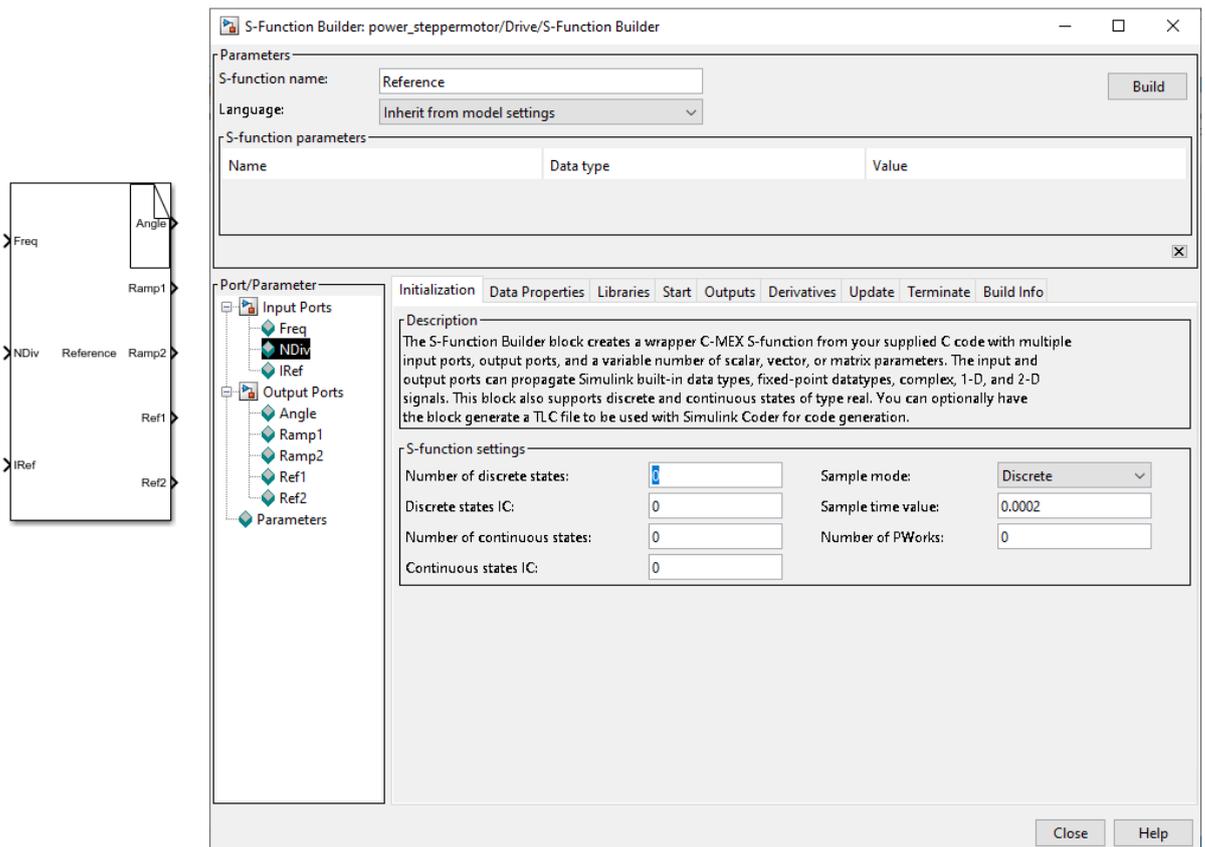


Рисунок 4.1 – Используемый блок S-Function Builder.

Ниже представлен листинг с используемым программным кодом. Текущая реализация задающего сигнала позволяет устанавливать количество дроблений шага от 1 до 2^{16} .

```

unsigned static Step1, Step2, Delta;
float Temp1, Temp2;
int StepPrev = 0;
float Pi=3.141592653;

Angle[0] += 0.0002*Freq[0];

if ((Angle[0] >= 1) || (Angle[0] <= -1))
{
    Angle[0] = 0;
    Angle[0] += 0.0002*Freq[0];
}

Ramp1[0] = Angle[0];
Ramp2[0] = Angle[0]+0.25;
if (Ramp2[0] >= 1) Ramp2[0] -= 1;

if (NDiv[0] <= 0) NDiv[0] = 0;

Step1 = Ramp1[0] * (2 * NDiv[0]);
Step2 = Ramp2[0] * (2 * NDiv[0]);
Ramp1[0] = Step1 / (2 * NDiv[0]);
Ramp2[0] = Step2 / (2 * NDiv[0]);

Delta = Step1 - StepPrev;
if ((Freq[0] > 0) && (Delta < 0)) Delta += (2 * NDiv[0]);
if ((Freq[0] < 0) && (Delta > 0)) Delta -= (2 * NDiv[0]);
StepPrev = Step1;

Temp1 = IRef[0] * cos(Ramp1[0]*2*Pi);
Temp2 = IRef[0] * cos(Ramp2[0]*2*Pi);

Ref1[0]=Temp1;
Ref2[0]=Temp2;

```

Листинг 4.1 – Реализация задатчика требуемого сигнала при помощи языка C.

В результате работы разработанного алгоритма получены следующие формы выходных сигналов задания формы тока: на рисунке 4.2 представлены сигналы при частоте 5 Гц и дроблении шага равном 1, что соответствует режиму 180-градусной коммутации для двухфазного двигателя;

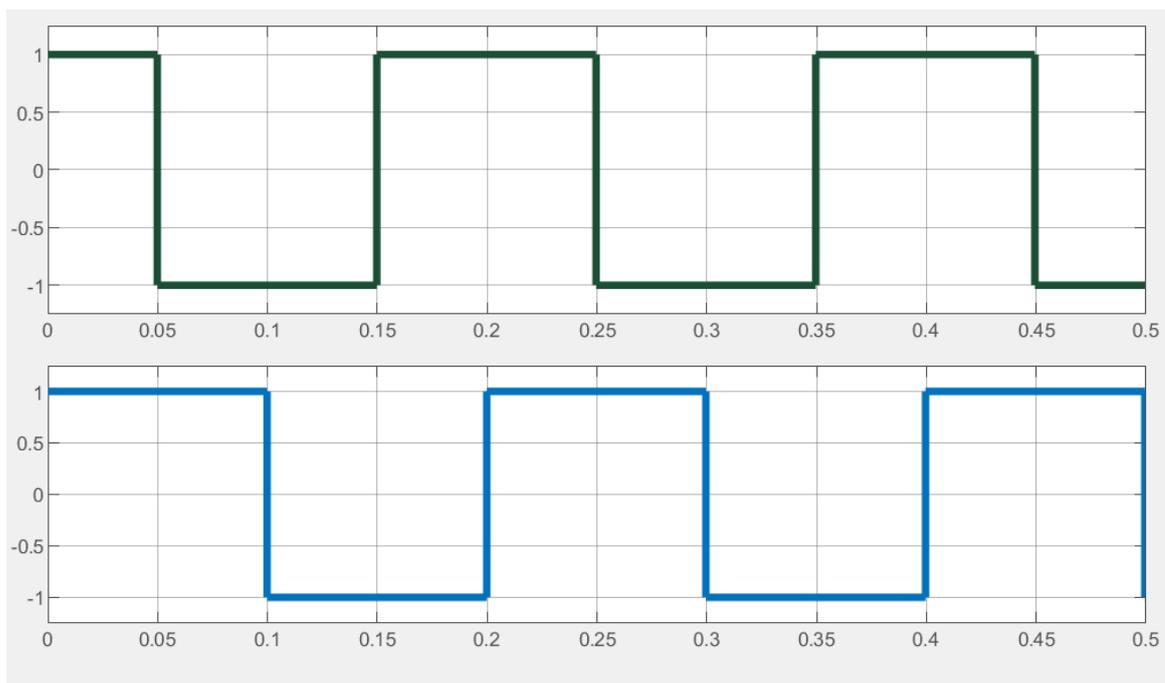


Рисунок 4.2 – Сигнал при дроблении шага равному 1.

На рисунке 4.3 представлен результат работы блока при заданной частоте 5 Гц и дроблении шага равному 1024, что соответствует требуемой форме задания в режиме микрошаговой коммутации для двухфазного двигателя.

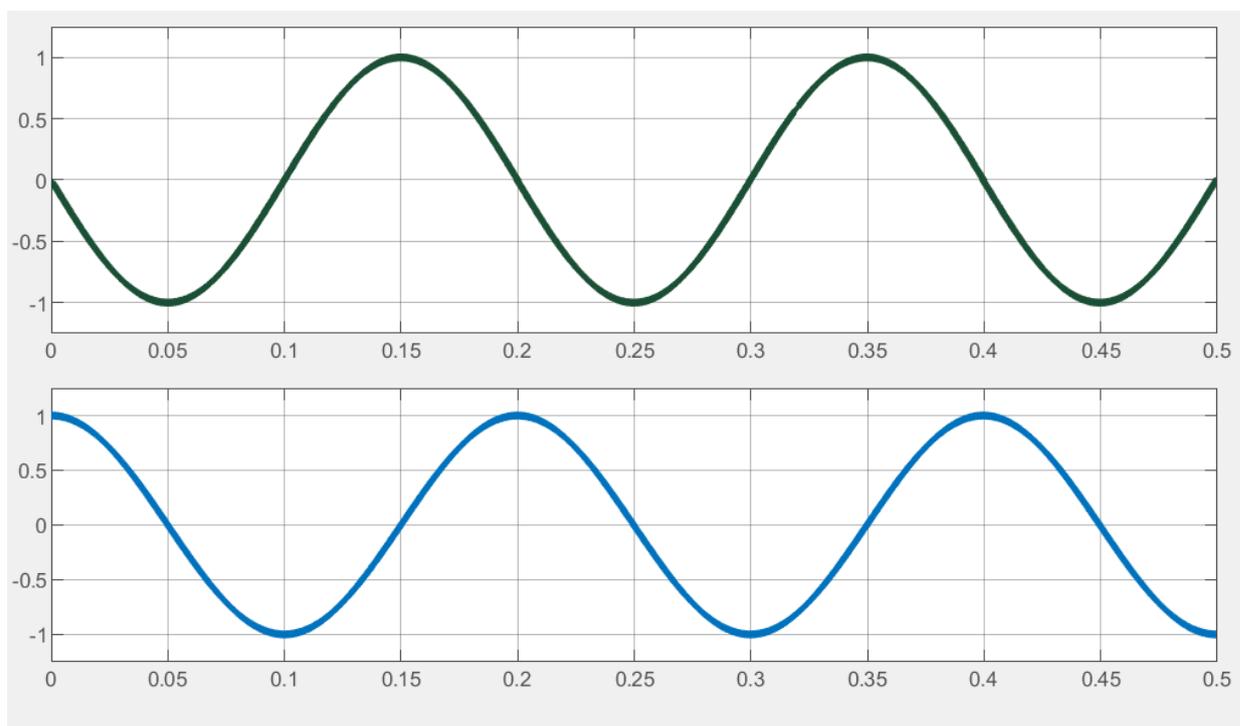


Рисунок 4.2 – Сигнал при дроблении шага равному 1024.

Как видно из представленных диаграмм работы, разработанный в среде MATLAB R2019a Simulink алгоритм позволяет сформировать требуемый сигнал задания. Этот сигнал сравнивается с сигналами обратной связи токов в фазах ПИД-регуляторами и на основании разницы между ними формируется необходимое управление инвертором напряжения. Данная система в совокупности представлена на рисунке 4.3.

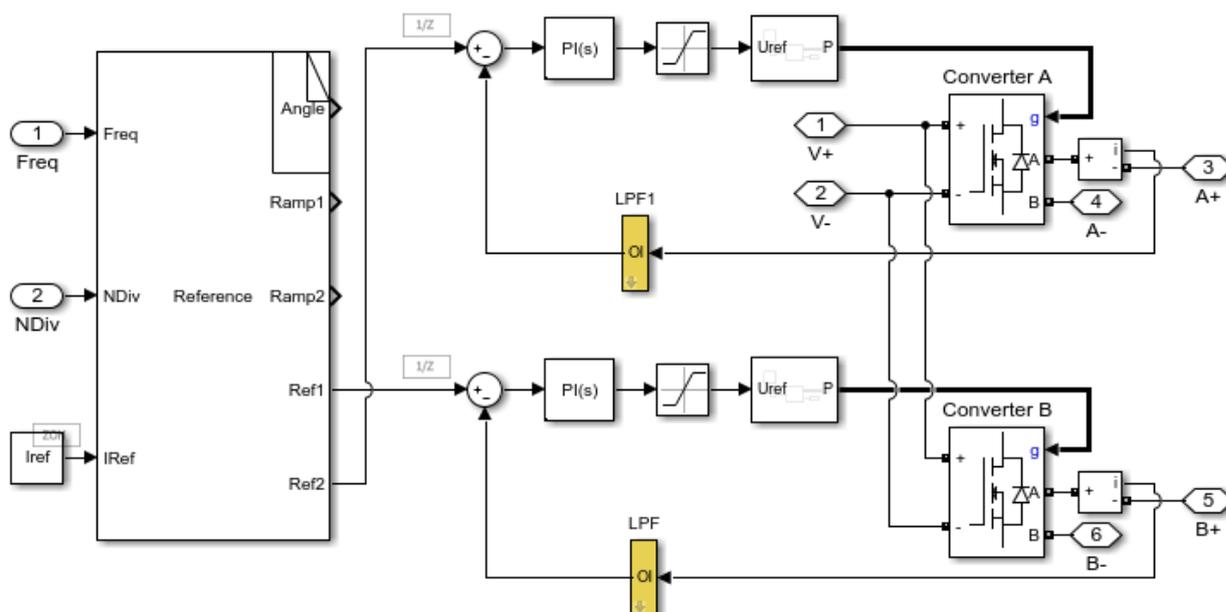


Рисунок 4.3 – Имитационная модель системы управления двухфазным двигателем.

В качестве исследуемого двигателя будем использовать двигатель 14Ф151.3413-0 (производство АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва):

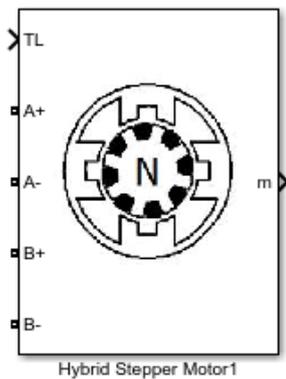
- Тип двигателя: Шаговый, СДЭР.
- Угол поворота за один шаг: 1,8 градуса.
- Количество шагов на полный оборот вала: 200.
- Количество выводов: 4.
- Количество обмоток: 2.
- Сопротивление обмотки 68,5 Ом.

- Индуктивность обмотки: 388,7 мГн.
- Номинальный ток: 0,4 А.
- Номинальное напряжение: 90 В.



Рисунок 4.4 – Двигатель 14Ф151.3413-0

Данный двигатель будет симитирован при помощи стандартной математической модели шагового двигателя Hybrid Stepper Motor из библиотеки MATLAB Simulink. На рисунке 4.5 представлен внешний вид данной математической модели [11].



Block Parameters: Hybrid Stepper Motor

Parameters

Motor type Permanent-magnet / Hybrid

Number of phases 2

Winding Inductance (H) 388e-3

Winding resistance (Ohm) 68.5

Step angle (degree) 1.8

Maximum Flux Linkage (Vs) 0.02187765

Maximum Detent Torque (N.m) 0.02

Total inertia (kg.m.m) 1.2e-6

Total friction (N.m.s) 1e-3

Initial speed (rad/s) 0

Initial position (degrees) 0

Sample time (-1 for inherited) -1

OK Cancel Help Apply

Рисунок 4.5 – Параметры используемой модели шагового двухфазного двигателя.

Рассчитаем максимальное потокосцепление ψ_m двигателя, значение данного параметра не предоставлено в техническом паспорте устройства. Расчет производится по следующей формуле [12]:

$$\psi_m = \frac{30}{p\pi} \cdot \frac{E_m}{N},$$

где E_m и N – параметры, получаемые экспериментально: N – скорость вращения вала в об/мин, а E_m – максимальное амплитудное значение

возникающего противо-ЭДС на одной из обмоток двигателя при скорости N ;
 p – количество пар полюсов двигателя, определяющееся по формуле:

$$p = \frac{360}{2m \cdot \text{step}},$$

где m – количество обмоток, step – угол поворота за один шаг.

Количество пар полюсов исследуемого двигателя равно 50. При экспериментальном определении противо-ЭДС вал двигателя был разогнан до скорости вращения в 322 об/мин, а амплитуда напряжения составляла 36,88 В. Отсюда максимальное потокосцепление равно 0,02187765 Вб.

Математическая модель испытательного оборудования представлена на рисунке 4.6. Данной математической моделью обеспечены все необходимые функции для реализации испытаний: присутствует система задания сигнала тока нужной формы, используется система управления с ПИ-регулятором задания на инвертор, реализованы линейные и ступенчатые задатчики интенсивности как частоты, так и момента нагрузки посредством блоков Signal Builder, используется математическая модель шагового двухфазного двигателя с выведенной обратной связью по напряжению, току, моменту, скорости и углу поворота вала.

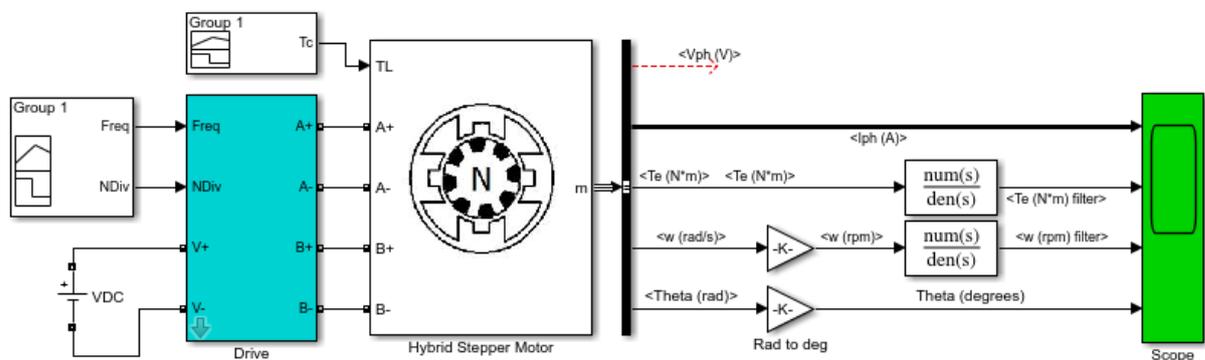


Рисунок 4.6 – Математическая модель испытательного оборудования.

Оптимизация регулятора тока проводится без учёта влияния обратной связи по ЭДС двигателя и влияния изменения угла между вектором потока от постоянных магнитов и вектором напряжений.

$$k_{\text{инв}} = 1 \text{ – коэффициент усиления инвертора;}$$

$$k_{\text{от}} = 1 \text{ – коэффициент обратной связи по току;}$$

$$T_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ с;}$$

$$T_{\text{инв}} = \frac{T_{\text{шим}}}{4} = \frac{0,0002}{4} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с – постоянная времени инвертора;}$$

$$T_{\text{э}} = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,388}{68,5} = 0,006 \text{ с – электромагнитная постоянная времени.}$$

Малая постоянная времени в цепи обратной связи по току

$$T_{\text{мто}} = \frac{1}{10^{\left| \lg(f_{\text{шим}}) - \frac{\Delta L}{20} \right|}} = \frac{1}{10^{|\lg(f_{\text{шим}}) - \lg(0,5)|}} = \frac{1}{10^{\left| \lg\left(\frac{f_{\text{шим}}}{0,5}\right) \right|}} =$$

$$= \frac{1}{10^{\left| \lg\left(\frac{5000}{2\pi \cdot 0,5}\right) \right|}} = 0,000628 \text{ с.}$$

Эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$T_{\text{мтэ}} = 2T_{\text{инв}} + T_{\text{мто}} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} + 0,000628 = 0,000728 \text{ с.}$$

В качестве регулятора тока принимаем ПИ–регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}}(p) = k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} \cdot p + 1}{T_{\text{рт}} \cdot p}$$

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{рт}} = T_{\text{э}} = 0,006 \text{ с}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_s \cdot R_s}{k_{\text{от}} \cdot k_{\text{инв}} \cdot 2T_{\mu\text{тэ}}} = \frac{\frac{L_s}{R_s} \cdot R_s}{2 \cdot \left(2 \cdot \frac{T_{\text{шим}}}{4} + T_{\mu\text{то}} \right)} = \frac{L_s}{T_{\text{шим}} + 2 \cdot T_{\mu\text{то}}} =$$
$$= \frac{0,388}{0,0002 + 2 \cdot 0,000628} = 266,5$$

Произведем имитацию испытаний на получение выходной характеристики. Для этого выставим номинальное напряжение на источнике постоянного тока и установим амплитуду тока в обмотках равной номинальному значению – 0,4 А. Первая характеристика будет производиться при дроблении шага равном 1, 180-градусный режим управления СДЭР. Выставим коммутационную частоту как 5 Гц.

При помощи задатчика выставим возрастающий момент нагрузки. Момент будет возрастать от 0 до 0,7 Нм за 0,5 с. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.7.

16

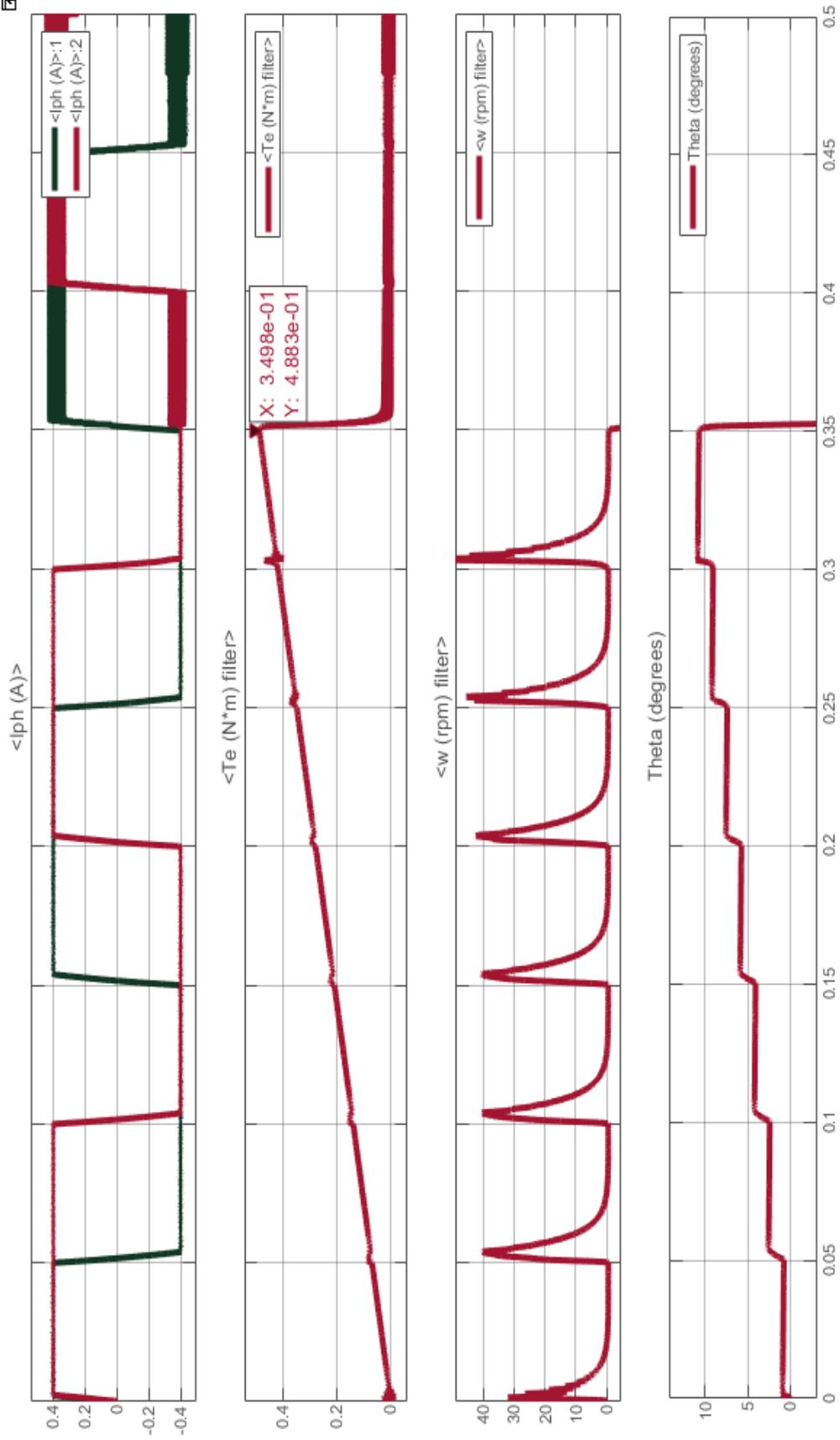


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования при частоте 5 Гц в 180-градусном режиме управления.

Как видно из графика, выход двигателя из синхронизма произошел при моменте на валу в 0,488 Нм. Для построения графика выходной характеристики необходимо провести аналогичные испытания при различных скоростях.

На рисунке 4.8 представлен график выходных характеристик. Замеры проводились с изменением частоты шагом в 5 Гц.

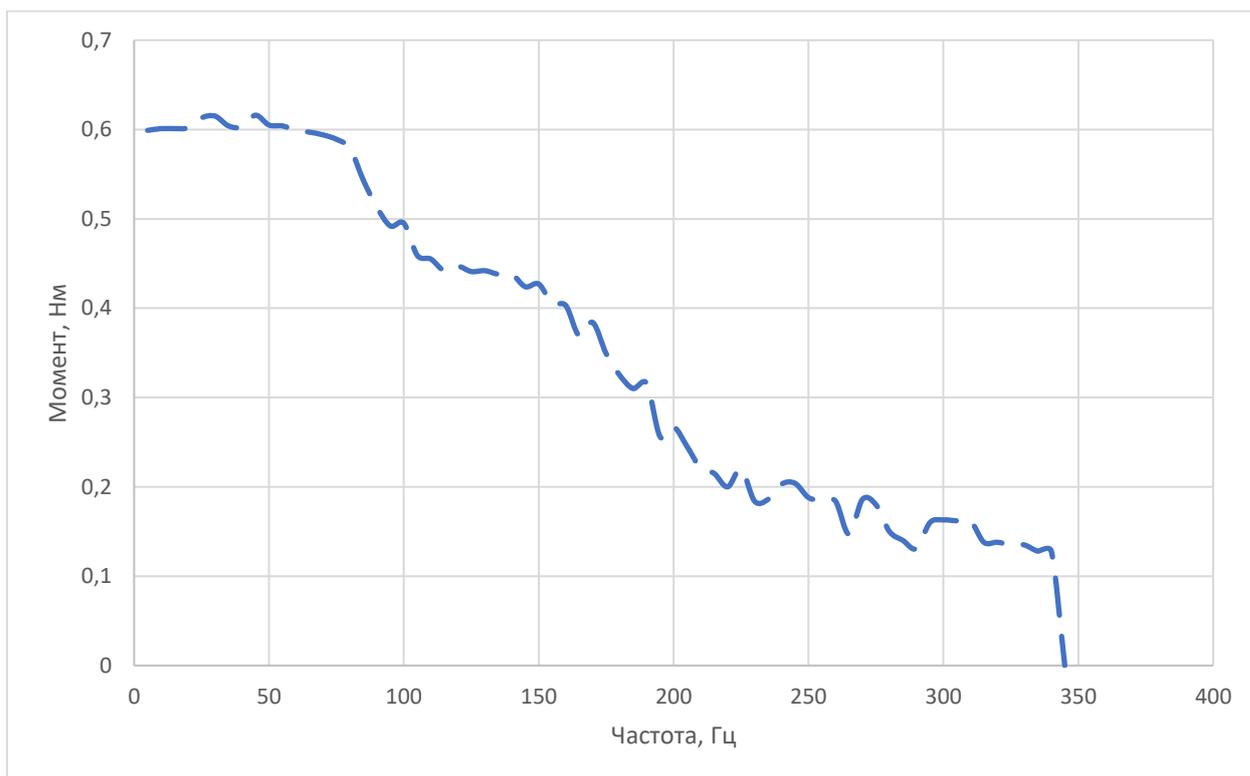


Рисунок 4.8 – График выходных характеристик при 180-градусном режиме управления.

Произведем снятие характеристик в микрошаговом режиме управления СДЭР. Для этого выставим значение дробления шага как 1024. Замер проводится при частоте 5 Гц.

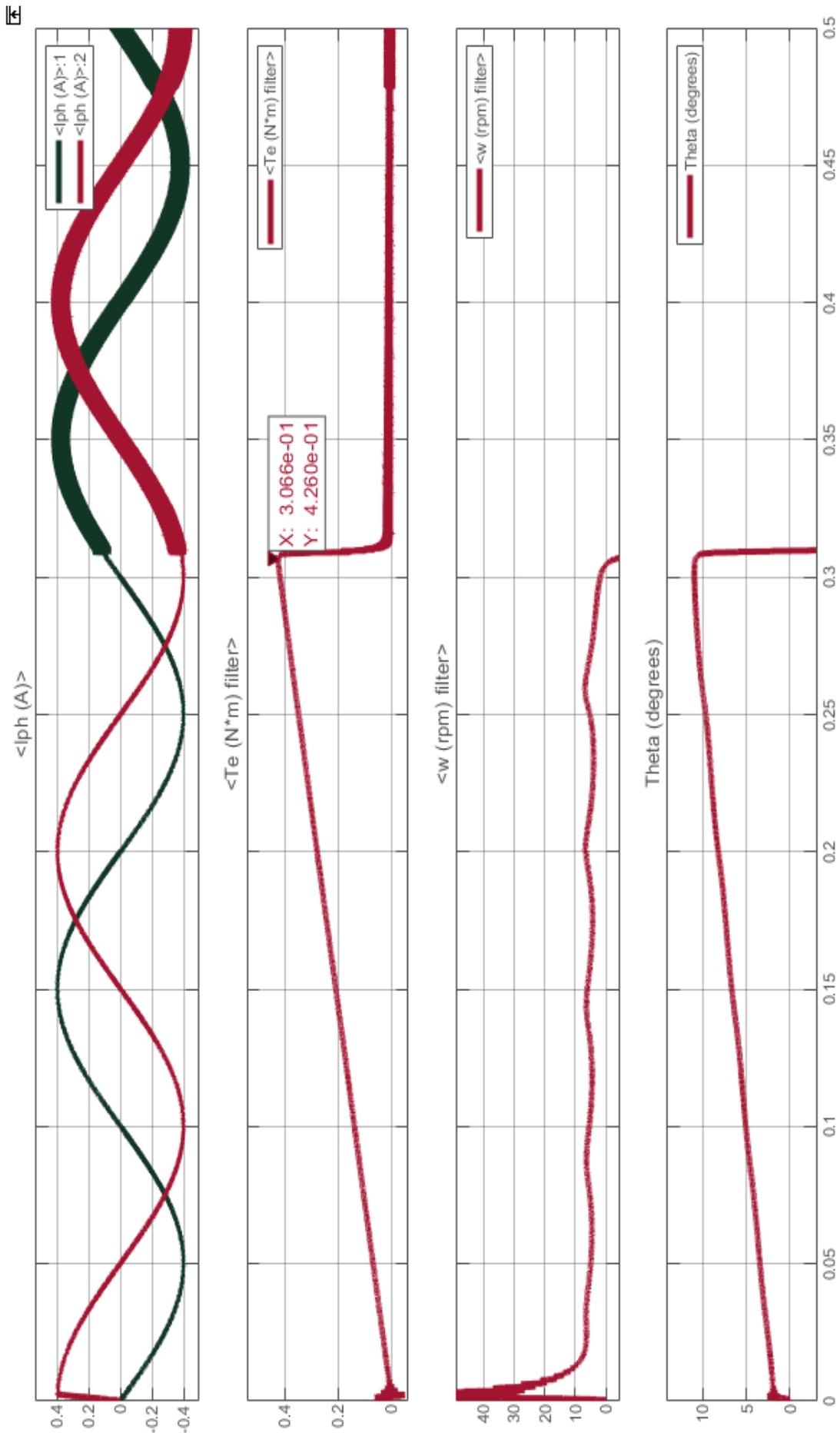


Рисунок 4.9 – Результаты моделирования при частоте 5 Гц в микрошаговом режиме управления.

Как видно из графика, момент выпадения из синхронизма снизился, 0,426 Нм в микрошаговом режиме управления. Но в данном режиме значительно увеличилась плавность вращения вала. Кривая графика поворота вала имеет линейный характер.

На рисунке 4.10 представлен график выходных характеристик. Замеры проводились с изменением частоты шагом в 5 Гц.

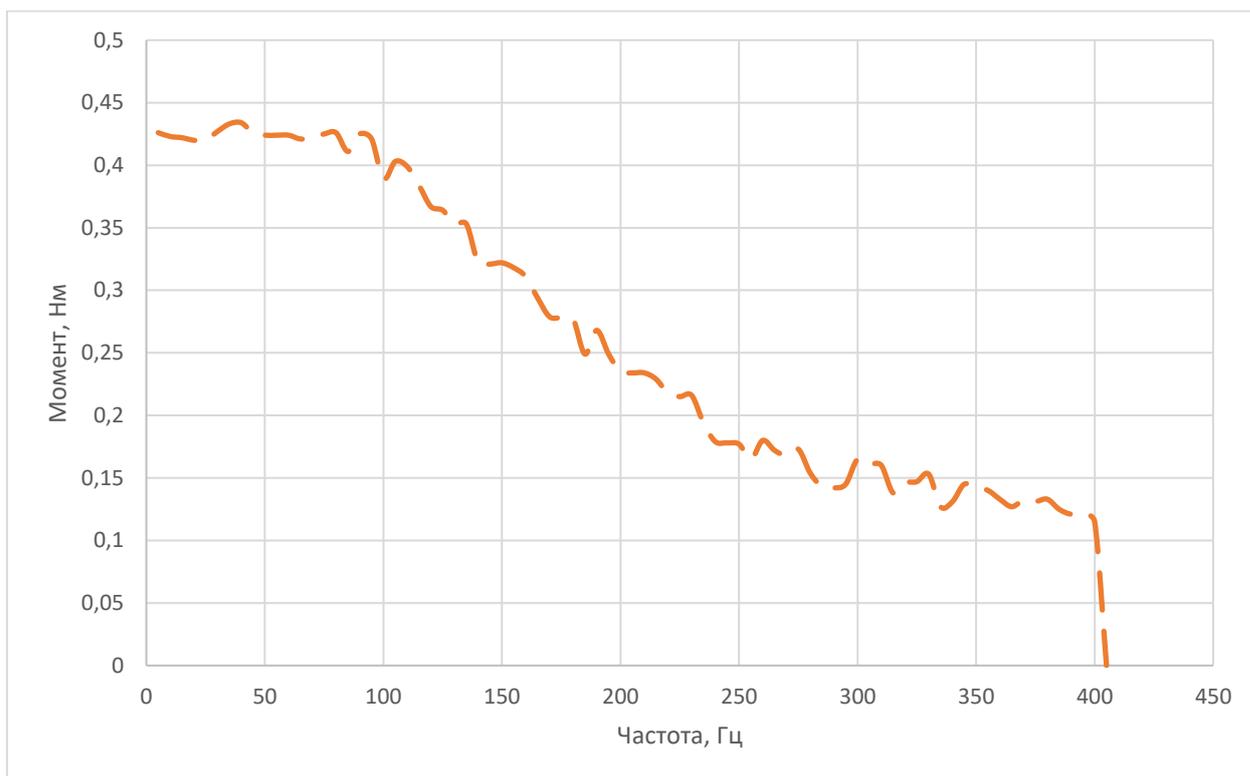


Рисунок 4.10 – График выходных характеристик при микрошаговом режиме управления.

Согласно полученным рисункам можно сделать вывод, что выходная характеристика при работе двигателя в режиме 180-градусной коммутации более крутая. На частотах до 200 Гц момент потери синхронизации при прямоугольном сигнале задания тока значительно выше, чем при работе в микрошаговом режиме. Полученное отличие обусловлено различным действующим значением тока в обмотках при различной форме токов. В области от 200 Гц до 340 Гц кривые схожи по показателям.

5. Макетирование БУ КПА ЭД

Макетирование проводилось на импортной элементной базе под управлением микропроцессора производства НИИЭТ К1921ВТ01К.

С модуля разработчика MBS-K1921BK01T на две силовые платы PowerCard-03 v2.2 подаются сигналы управления ШИМ. С силовых плат на процессорную плату поступают сигналы с четырех датчиков тока.

Связь с модулем разработчика MBS-K1921BK01T осуществляется по стандарту данных Ethernet.

Силовая плата PowerCard-03 v2.2. из состава преобразователя частоты MBS-FC01.

Основные функциональные элементы платы PowerCard-03V2.2:

- 1) силовой интеллектуальный IGBT-модуль;
- 2) входной силовой выпрямительный мост VD1;
- 3) батарея конденсаторов звена постоянного тока;
- 4) схема заряда конденсаторов;
- 5) схема управления тормозным ключом;
- 6) схема управления силовым модулем;
- 7) датчики тока выходных фаз;
- 8) датчик напряжения звена постоянного тока.



Рисунок 5.1 – Макет

Для отладки режима позиционирования использовался абсолютный датчик ЛИР-ДА159Б.001ПС. Датчик подключается по шине SPI, формирует информацию об угле поворота в последовательном формате SSI. Датчик выдаёт 16-ти битный сигнал угла поворота, что соответствует требуемой точности.

5.1 Объекты регулирования

Для отладки и проверки ПО применялись два типа двигателя. Шаговый двигатель ПБМГ-200-265 (N0 Ф.9038640) и двухфазный двигатель 14Ф151.3413-0.

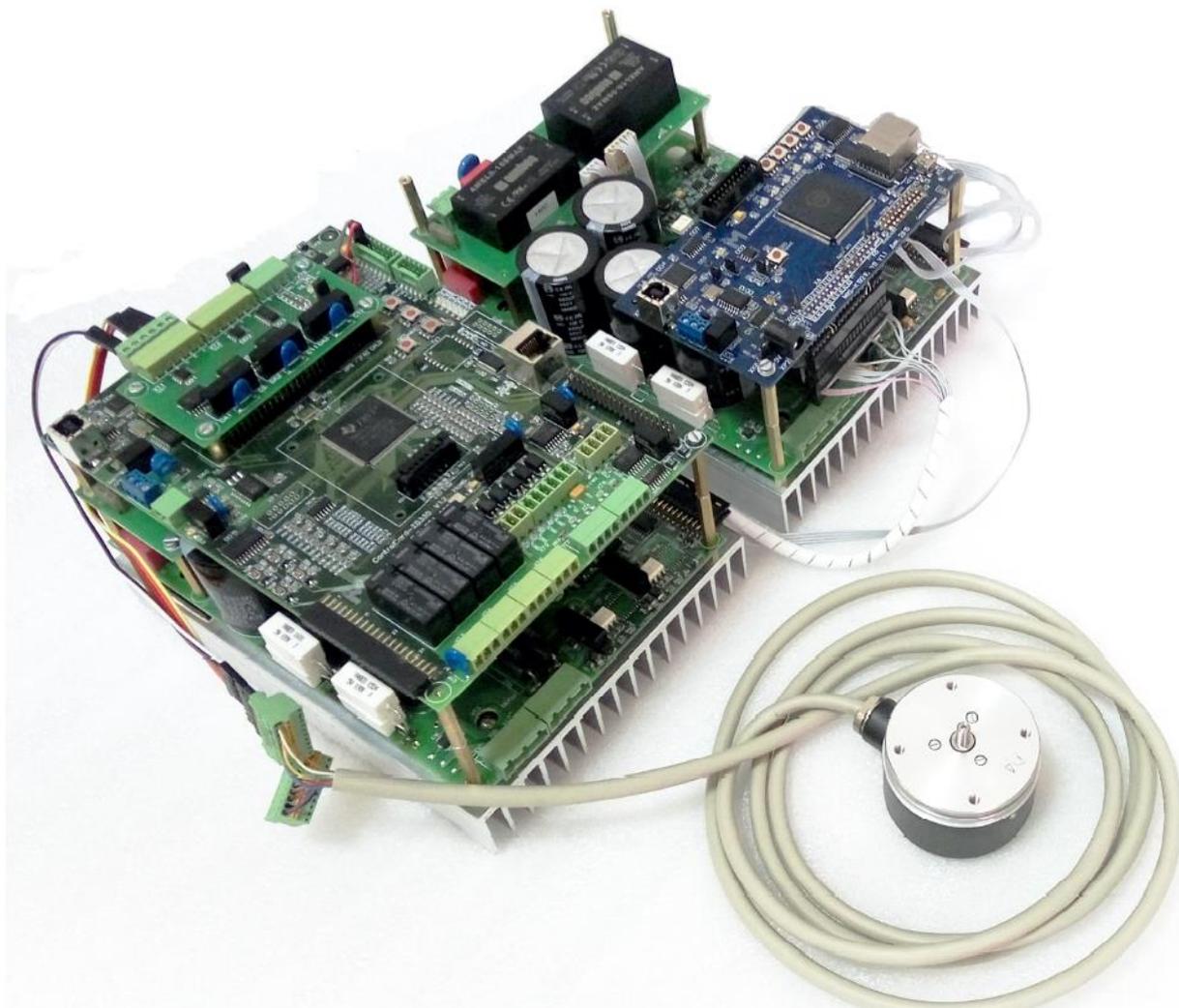


Рисунок 5.2 – Абсолютный датчик положения ЛИР-ДА159Б.001ПС
подключенный к макету

Двигатель 14Ф151.3413-0 описывался в 4 главе.

Двигатель: ПБМГ-200-265:

- Тип двигателя: Шаговый, униполярный.
- Угол поворота за один шаг: 1,8 градуса.
- Количество шагов на полный оборот вала: 200.

- Количество выводов: 6.
- Количество обмоток: 2 обмотки.
- Напряжение питания: 12 В.
- Сопротивление обмоток 70 Ом.
- Индуктивность обмоток: минимальная 105 мГн, максимальная 170 мГн.
- Потребляемый ток: 0,17 А.



Рисунок 5.3 – ПБМГ-200-265 (N0 Ф.9038640)

6. Разработка программного обеспечения

Программное обеспечение нижнего уровня выполнено в среде визуального программирования MexBIOS Development Studio. Применение данной среды программирования позволит реализовать функцию изменения всех параметров управления двигателем в реальном времени.

Основной алгоритм работы выполняется на частоте 5 кГц. В зависимости от режима включается в работу та или иная часть алгоритма.

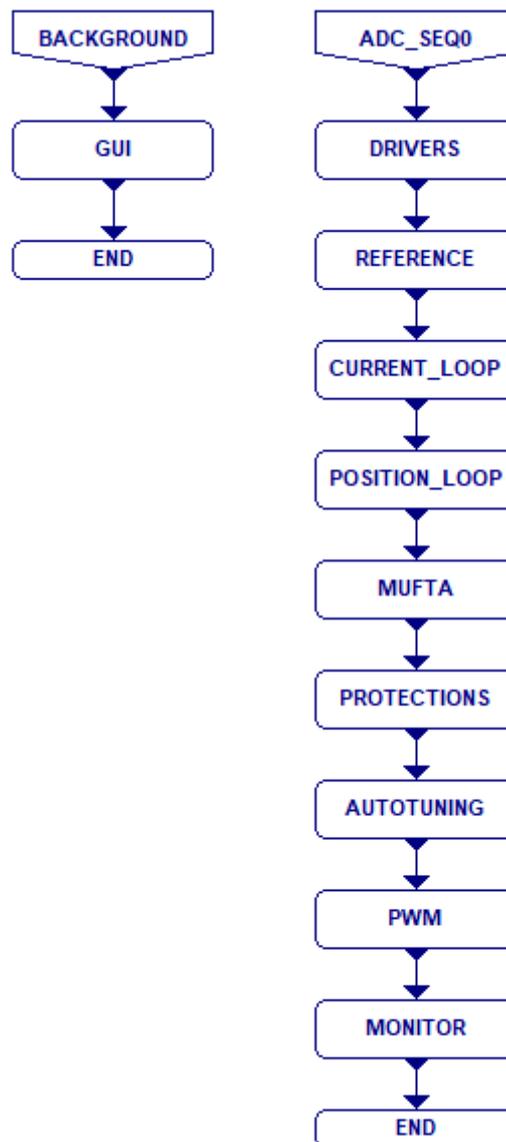


Рисунок 6.1 – Внешний вид структуры ПО в MexBIOS Development Studio

На рисунке 6.1 каждый блок выполняет следующие функции:

- GUI – внутренний интерфейс пользователя;
- Drivers – подсистема, в которой происходит получение сигналов с обратных связей и их первичная обработка для дальнейшего использования в управлении;
- Reference – подсистема, в которой происходит формирование задающих сигналов;
- Current_loop – подсистема контура тока;
- Position_loop – подсистема контура положения;
- Mufta – алгоритм намагничивания и размагничивания гистерезисной муфты;
- Protections – система программных защит;
- Autotuning – алгоритм автоматического расчета коэффициентов регулятора тока;
- PWM – система управления ШИМ;
- Monitor – система мониторинга.

Переключение между режимами происходит с программы верхнего уровня.

В программном обеспечении реализованы следующие режимы работы:

Для 2х фазных ШД:

- а) Управление 2х фазным ШД в микрошаговом режиме;
- б) Управление 2х фазным ШД в шаговом режиме.

Для 3х фазных ШД:

- а) Управление 3х фазным ШД в микрошаговом режиме;
- б) Управление 3х фазным ШД в шаговом режиме.

В системе Reference реализован линейный задатчик интенсивности. Линейный задатчик интенсивности применяется для режима управления «Задание частоты».

Для каждого типа двигателя реализованы следующие режимы работы:

а) микрошаговый режим управления (форма тока – синусоидальная) с заданным коэффициентом электрического дробления конструктивного шага двигателя $k_{др}$. Значение коэффициента дробления шага $k_{др}$ изменяется в диапазоне от 2^0 до 2^6 . Микрошаговый режим с коэффициентом дробления $k_{др} = 2^0$ аналогичен шаговому режиму управления;

б) шаговый режим управления (форма тока - прямоугольная).

По умолчанию установлен микрошаговый режим с коэффициентом дробления шага $k_{др} = 64$.

7. Управление СДЭР

7.1 Управление 2х фазным СДЭР

7.1.1 В микрошаговом режиме

Форма тока должна быть:

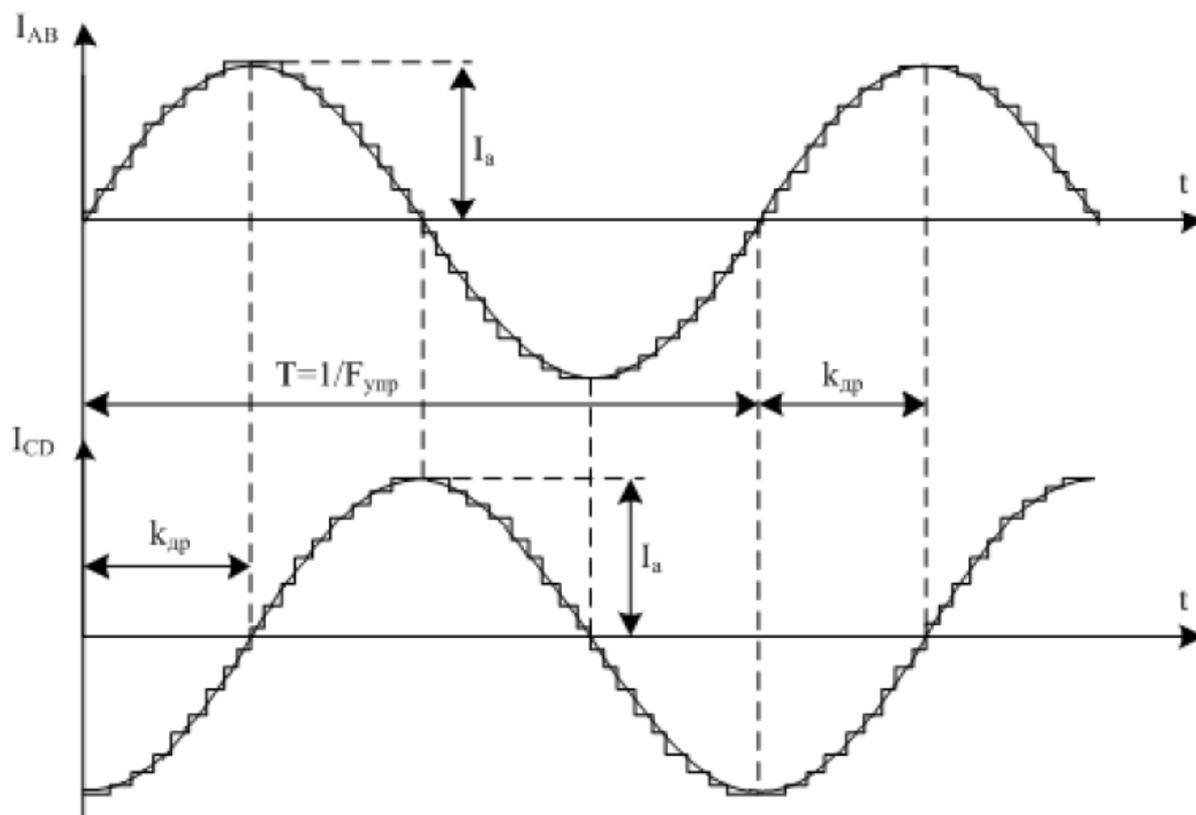


Рисунок 7.1 – Форма сигналов тока для двухфазного шагового двигателя

В микрошаговом режиме в системе Reference формируется форма задания, которая обрабатывается регуляторами тока в подсистеме Current_loop. Регуляторы тока формируют задание на напряжение в системе PWM.

Результат обработки сигнала задания и форма токов представлены на следующем рисунке:

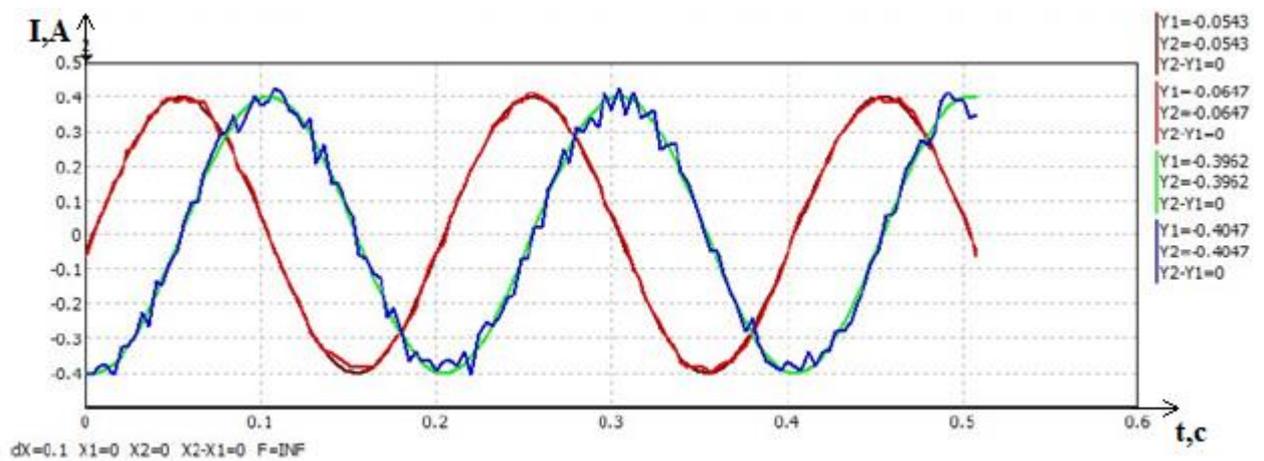


Рисунок 7.2 – Сигналы задания и отработка токов системой управления в микрошаговом режиме работы

Из рисунка 7.2 видно, что задание обрабатывается с небольшой ошибкой. При измерении данная ошибка не превышает требования.

7.1.2 Управление 2х фазным СДЭР в шаговом режиме

В шаговом режиме в системе Reference формируется форма задания, которая обрабатывается регуляторами тока в подсистеме Current_loop. Регуляторы тока формируют задание на напряжение в системе PWM.

Результат отработки сигнала задания и форма токов представлены на следующем рисунке:

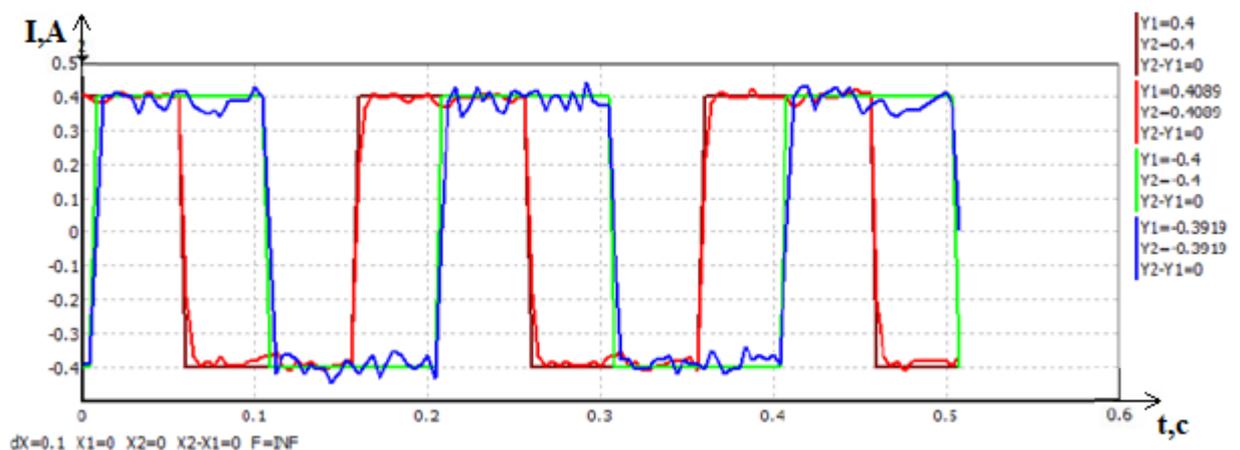


Рисунок 7.3 – Сигналы задания и отработка токов системой управления в шаговом режиме работы

Из рисунка 7.3 видно, что задание обрабатывается с небольшой ошибкой. При измерении данная ошибка не превышает требования.

7.2 Управление 3х фазным СДЭР

7.2.1 Управление 3х фазным СДЭР в микрошаговом режиме

В микрошаговом режиме в системе Reference формируется форма задания, которая обрабатывается регуляторами тока в подсистеме Current_loop. Регуляторы тока формируют задание на напряжение в системе PWM.

Результат обработки сигнала задания и форма токов представлены на следующем рисунке:

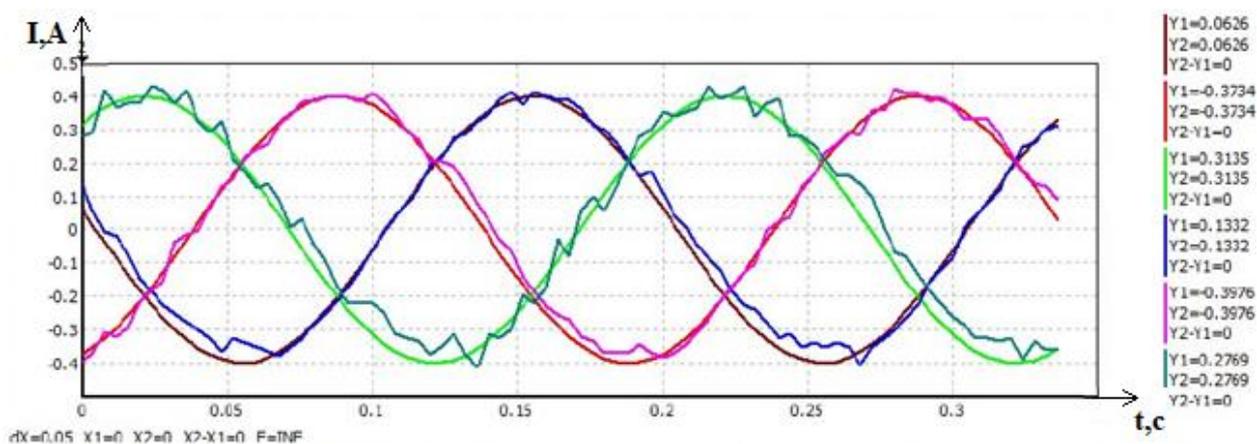


Рисунок 7.4 – Сигналы задания и отработка токов системой управления в микрошаговом режиме работы

Из рисунка 7.4 видно, что задание обрабатывается с небольшой ошибкой. При измерении данная ошибка не превышает требования.

7.2.2 Управление 3х фазным ШД в шаговом режиме

В шаговом режиме в системе Reference формируется форма задания, которая обрабатывается регуляторами тока в подсистеме Current_loop. Регуляторы тока формируют задание на напряжение в системе PWM.

Результат обработки сигнала задания и форма токов представлены на следующем рисунке:

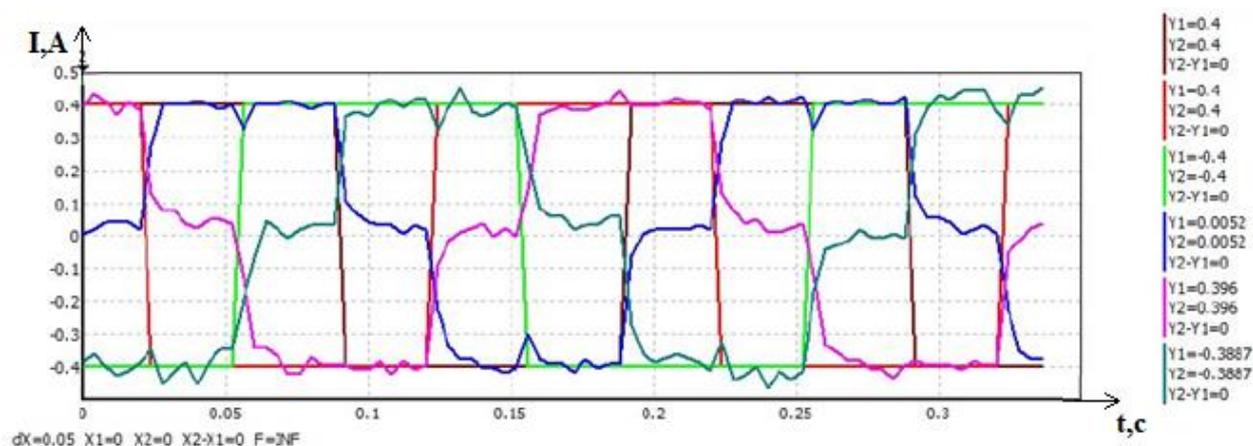


Рисунок 7.5 – Сигналы задания и отработка токов системой управления в шаговом режиме работы

Из рисунка 7.5 видно, что задание отрабатывается с небольшой ошибкой. При измерении данная ошибка не превышает требования.

Как видно из графиков, формы токов повторяют форму задания, полученного на прошлом этапе исследований, что подтверждает принципиальную возможность создания действующего прототипа БУ КПА ЭД.

8. Разработка программных защит

Для обеспечения требований были созданы следующие защиты:

а) Тепловая защита, с формированием сигнала предупреждения о тепловой перегрузке и сигнала отключения инвертора по перегреву.

Алгоритм работы: С АЦП поступает сигнал с датчика температуры, который установлен на радиаторе охлаждения силовых ключей. При превышении первой уставки срабатывает сигнализация - начинает мигать светодиод работы, при превышении второй уставки работа алгоритма останавливается, появляется сообщение в программе верхнего уровня.

б) Защита от короткого замыкания - максимально-токовая.

Алгоритм работы: С АЦП поступают сигнал обратной связи по току. При превышении тока уставки запрещается формирование ШИМ. Соответствующая сигнализация появится в программе верхнего уровня.

в) Защита от пониженного напряжения или исчезновения силового питания.

Алгоритм работы: Сигнал напряжения звена постоянного тока поступает с АЦП. Если сигнал снизится ниже порогового значения, перестанет формироваться ШИМ и сформируется сигнал аварии.

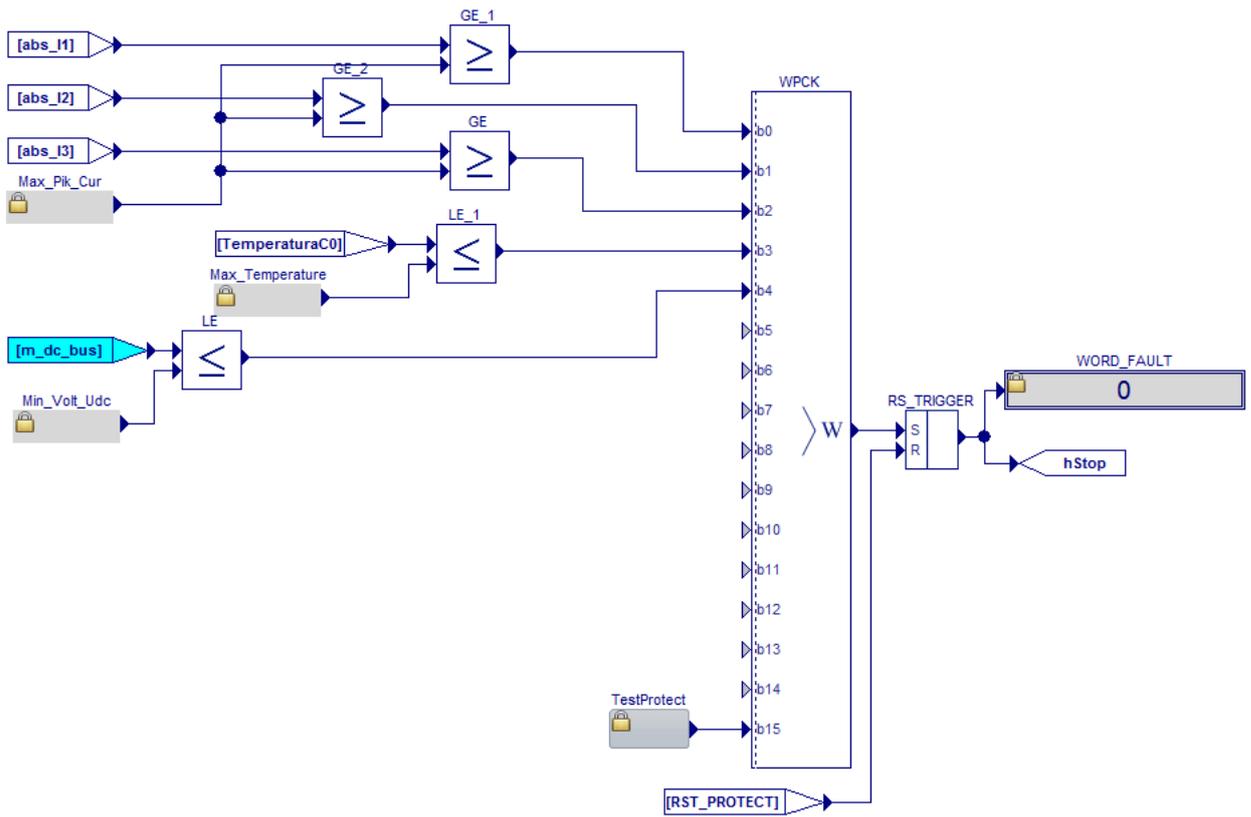


Рисунок 8.1 – Программные защиты

9. Техничко–экономическое обоснование выбора компонентов БУ КПА ЭД

Для изготовления прототипа блока управления КПА ЭД было предложено использование ЭРИ как иностранного так и отечественного производства. Для обоснования выбора компонентов рассмотрим основные узлы БУ КПА ЭД.

9.1 MOSFET транзисторы

Основным элементом силовой части инвертора БУ КПА ЭД являются 12 силовых MOSFET транзисторов, исходя из анализа характеристик предъявляемых к БУ КПА ЭД в ТЗ возможно применить либо MOSFET транзисторы из числа ЭРИ ИП IRFR220NTRLPBF, либо их отечественный аналог КП749. Проведя анализ технической документации и составив сравнительную таблицу MOSFET транзисторов можно сделать вывод, что транзисторы практически не отличаются по своим характеристикам в следствии чего для изготовления БУ КПА ЭД применим MOSFET транзистор КП749 исходя из требования ТЗ касательно применения ЭРИ ОП.

Таблица 9.1 – Сравнительная таблица MOSFET транзисторов

Функция	КП749	IRFR220NTRLPBF
Максимальный ток стока, А	5,2	5
Время, нс		
включения	29,2	17,4
выключения	32	32
Пороговое напряжение, В		
min	2	2
max	4	4
Ток утечки, нА	±100	±100

9.2 Модуль драйвера MOSFET транзисторов

Микросхема (или модуль) драйвера МД150А функционально и конструктивно является функциональным аналогом драйвера HCPL-3150. Данный драйвер предназначен для управления IGBT и MOSFET мощностью до 600 В/400 А или 1200 (1700) В/200 А. Драйвер имеет встроенную гальваническую развязку цепей управления и схему защиты по ненасыщению управляемого транзистора. В состав драйвера не входит DC/DC-преобразователь. Согласно сравнительной таблице микросхем драйверов применение драйвера МД150А позволит за счет особенностей внутренних схемотехнических решений драйвера уменьшить габариты данного функционального модуля БУ КПА ЭД.

Таблица 9.2 – Сравнительная таблица микросхем драйверов

Функция	МД105А	HCPL-3150
Управление затвором с достаточным имп. током	+	Требуется внешний усилительный каскад
Контроль за напряжением насыщения	+	+
Сброс режима аварии	+	Требуется внешняя схема
Гальваническая развязка цепи управления	+	+
Гальваническая развязка цепи статусного сигнала	Требуется внешний оптрон	+

Таким образом, для построения полноценного драйвера IGBT-транзистора по минимальной цене и на минимальной площади (габаритных размерах) оптимальным решением является драйверы МД150А.

9.3 Модуль датчика тока

Для контроля токов в обмотках ЭД подключенного к БУ КПА ЭД необходимо производить их независимое измерение, для этого предлагается применять либо CSLW6B5 из числа компонентов ЭРИ ИП, либо аналогичный ЭРИ ОП: LA55-P-SP431. Анализ технической документации на представленные датчики тока показывает, что несмотря на гораздо больший диапазон измерения у LA55-P-SP431, используя внутрисхемные решения данный диапазон можно уменьшить сохранив требуемую точность измерения тока в фазах подключенного ЭД.

Таблица 9.3 – Сравнительная таблица датчиков тока

Функция	LA55-P-SP43	CSLW6B5
Напряжение питания	12В..15В	10,5В
Диапазон измерения	0..70А	0..5А
Измеряемый ток	Импульсный, переменный, постоянный	Импульсный, переменный, постоянный
Ток потребления	10мА	9мА
Ошибка преобразования	0,65% (на 1 виток)	+7%

Исходя из приведенной таблицы применим для измерения токов в БУ КПА ЭД датчик тока LA55-P-SP431.

9.4 Модуль измерения напряжения

Для измерения напряжения в звене постоянного тока и напряжения питания драйвера предлагается применить микросхему ADUM3190 или аналогичный по характеристикам модуль из числа ЭРИ ОП АОТ101БС. Сравнительная характеристика приведена в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Сравнительная таблица датчиков напряжения

Функция	АОТ101БС	ADUM3190
---------	----------	----------

Выходное напряжение	0,4В	1,225В
Входной ток, мА	10	5
Выходной ток, мА	2	2

Так как различие модулей не повлияет на возможность выполнения требований ТЗ, применим в БУ КПА ЭД АОТ101БС.

9.5 Модуль измерения температуры инвертора

Для измерения температуры инвертора предлагается применить либо терморезистор прямого подогрева вида А: СТ4-16А из числа ЭРИ ОП, либо терморезистор В57471V2103J062 из числа ЭРИ ИП.

Таблица 9.5 – Сравнительная таблица терморезисторов

Параметр	СТ3-19	В57471V2103J062
Диапазон рабочих температур, °С	-60..200	-55..125
Постоянная времени охлаждения, с	12	10
Максимальная мощность при 20 °С, мВт	250	210
Допуск сопротивления	±1	±3

Согласно сравнительной таблице для данных термисторов термистор СТ3-19 позволит измерять температуру модуля с более высокой точностью и в большем диапазоне температур.

9.6 ШИМ-контроллер

Для источника собственных нужд предлагается использовать ШИМ-контроллер LM5020MM из числа ЭРИ ИП, либо UC3842BN(КР1033ЕУ10) из числа ЭРИ ОП. Сравнение модулей приведено в таблице 9.6.

Таблица 9.6 – Сравнительная таблица терморезисторов

Параметр	UC3842BN(KP1033EY10)	LM5020MM
Максимальный рабочий ток, А	1	1
Рабочая частота	до 275 кГц	до 700 кГц
Обратная связь	по напряжению	по току
Напряжение питания, В	4,9..5,1	0,3..100
Задержка распротарнения, нс	150	100

Оба контроллера обеспечивают высокую точность задания – менее 3%, в итоге для БУ КПА ЭД применим UC3842BN(KP1033EY10).

9.7 Микроконтроллер

В качестве микроконтроллера предлагается применить МК K1921BK01T производства НИИЭТ г. Воронеж. Данный микроконтроллер содержит следующие функциональные элементы:

- процессорное ядро ARM Cortex-M4F с поддержкой набора одноцикловых команд умножения с накоплением (MAC), команд централизованного управления потоком данных (SIMD), арифметических и логических команд и встроенным модулем обработки команд с плавающей запятой (FPU) с одинарной точностью, производительность не менее 125 MIPS (миллионов инструкций в секунду);
- встроенную память программ типа FLASH емкостью 1 Мбайт;
- RAM объемом 192 Кбайт;
- дополнительную память данных типа FLASH объемом 64 Кбайта;

- контроллер внешней статической памяти (SRAM, PROM, NOR Flash);
- 32-канальный контроллер прямого доступа к памяти (DMA);
- схемы сброса и сторожевой таймер (Watchdog);
- часы реального времени (Real Time Clock) с батарейным питанием;
- синтезатор частоты на основе ФАПЧ (PLL);
- двенадцать 2-канальных 12-разрядных АЦП (2MS/s Sampling Rate at 12-bit Resolution, TSensor) с режимами цифрового компаратора для каждого из каналов (равно или больше, равно или меньше, попадание в диапазон, выход из диапазона), функция автоматического запуска модулей;
- ШИМ по событию АЦП (окончанию преобразования);
- восемнадцать модулей ШИМ (PWM), из них шесть модулей (HRPWM) с режимом «высокого» разрешения (возможность изменения длительности импульсов на величину менее периода тактового сигнала);
- шесть модулей захвата/сравнения (CAP);
- три аналоговых компаратора, функция автоматического запуска модулей ШИМ по событию сравнения (равно или больше, равно или меньше);
- три 32-битных таймера ЦПУ;
- два порта CAN 2.0b;
- два интерфейса I2C, с поддержкой режима High Speed (более 1 МГц);
- два импульсных квадратурных декодера (Enhanced Quadrature Encoded Pulse—eQEP), используемых для обработки сигналов датчика положения ротора в высокопроизводительных системах для определения положения, направления и скорости вращения;
- четыре порта SPI;

- четыре модуля SCI (UART);
- интерфейс USB 2.0 Device / Host с физическим уровнем (PHY);
- интерфейс Ethernet 10/100 Мбит/с с интерфейсом МП;
- отладочный интерфейс (JTAG and ARM Serial Wire Debug (SWD));
- не менее 88 выводов общего назначения (GPIO), отдельно программируемых мультиплексированных портов ввода/вывода.

9.8 Модуль связи с ЭВМ

Предлагается использование либо ЭРИ ИП FT2232D, либо среди ЭРИ ОП 5559ИН10АУ.

Обе микросхемы обеспечивают подключение по стандартам RS-232, RS-485, и обладают аналогичными техническими характеристиками, поэтому в БУ КПА ЭД применим К5559ИН10А(Б)УК.

9.9 Энергонезависимая память

Для хранения параметров предлагается использовать EEPROM память 1636РРАУ(БУ) которая представляет собой энергонезависимое запоминающее устройство типа «Flash» с количеством циклов перезаписи до нескольких десятков тысяч для хранения и оперативной модификации массивов данных, программного обеспечения и регулирующих воздействий аппаратуры специального назначения. Емкость одной микросхемы 16Мбит (2Мx8). Время выборки адреса по сигналу CE $t_A(CE)$ менее 100 нс.

9.10 Модуль аналого-цифрового преобразователя

Для обработки показаний аналоговых датчиков в БУ МК необходимо преобразовать их с помощью внешнего АЦП для повышения точности и качества обработки сигналов сравнительно со встроенным в МК АЦП. Для этого применим либо сигма-дельта-АЦП ADS1204, либо его аналог среди ЭРИ ОП: 1273ПВ19Т. Обе микросхемы представляют собой четырех канальный 16-

битный АЦП с 14-битной линейностью, однако микросхема 1273ПВ19Т имеет встроенные фильтры, что приведет к уменьшению общего числа элементов схемы БУ. Исходя из этого применим в БУ КПА ЭД в качестве внешнего АЦП микросхему 1273ПВ19Т.

9.11 Модуль преобразования уровней аналоговых сигналов

Для преобразования уровней аналоговых сигналов и фильтрации необходимо применить либо операционный усилитель AD8604, либо его аналог среди ЭРИ ОП: ОСМ КР140УД1408.

Таблица 9.7 – Сравнительная таблица модулей преобразования уровней аналоговых сигналов

Параметр	КР140УД1408	AD8604
Ток потребления	0,6 мА	0,7 мА
Разность входных токов	0,6 нА	0,75 мкА
Максимальное напряжение	13 В	6 В

Исходя из анализа технической документации микросхема КР140УД1408 обладает рядом преимуществ относительно зарубежного аналога, поэтому применим в БУ КПА ЭД в качестве модуля преобразования уровней аналоговых сигналов микросхему КР140УД1408.

10. Разработка вспомогательных функций встроенного программного обеспечения

10.1 Алгоритм работы гистерезисной муфты

Гистерезисная муфта состоит из двух основных элементов – полюсного статора и ротора. Ротор взаимодействует с магнитным полем и создаёт момент сопротивления.

Создаваемый гистерезисной муфтой момент пропорционален протекающему по обмотке статора току. После намагничения муфты остаётся остаточная намагниченность. Для размагничивания муфты необходимо вращать вал, периодически меняя направление вращения и постепенно уменьшать ток, протекающий через обмотку статора.

Для формирования тока статора используется сигнал тока с ГМ, заведённый на один из каналов АЦП. С помощью ПИ регулятора формируется заданный ток.

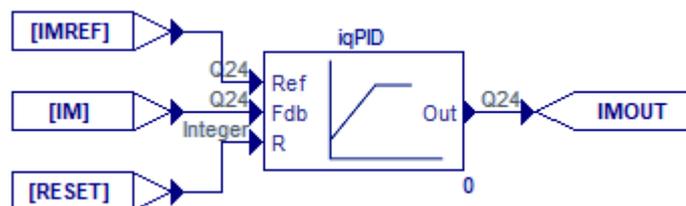


Рисунок 10.1 – Контур тока гистерезисной муфты

Когда подаётся команда на формирование момента с виртуального пульта управления или по адресу ModBusRTU происходит следующее:

- 1) По таблице переводится значение задания момента из Нм в соответствующий ток в амперах.
- 2) Полученное задание передаётся на ПИ регулятор тока.
- 3) Ток поддерживается на заданном уровне, пока не дана команда на размагничивание или стенд не произошло выключение стенда.

Когда подаётся команда на размагничивания с виртуального пульта управления или по адресу ModBusRTU происходит следующее:

- 1) Ток формируется ПИ регулятором.
- 2) Задание на входе ПИ регулятора начинает уменьшаться с определённой дискретностью.
- 3) Система управления переключается в «Микрошаговый режим» и двигатель начинает знакопеременно вращаться с заданной амплитудой тока.
- 4) Как только ток спадёт до нуля, происходит останов двигателя и выполняется сигнализация о завершении выполнения процедуры размагничивания гистерезисной муфты.

10.2 Получение действующего значения тока

Для индикации величины протекающего действующего значения тока в фазах двигателя была собрана следующая схема:

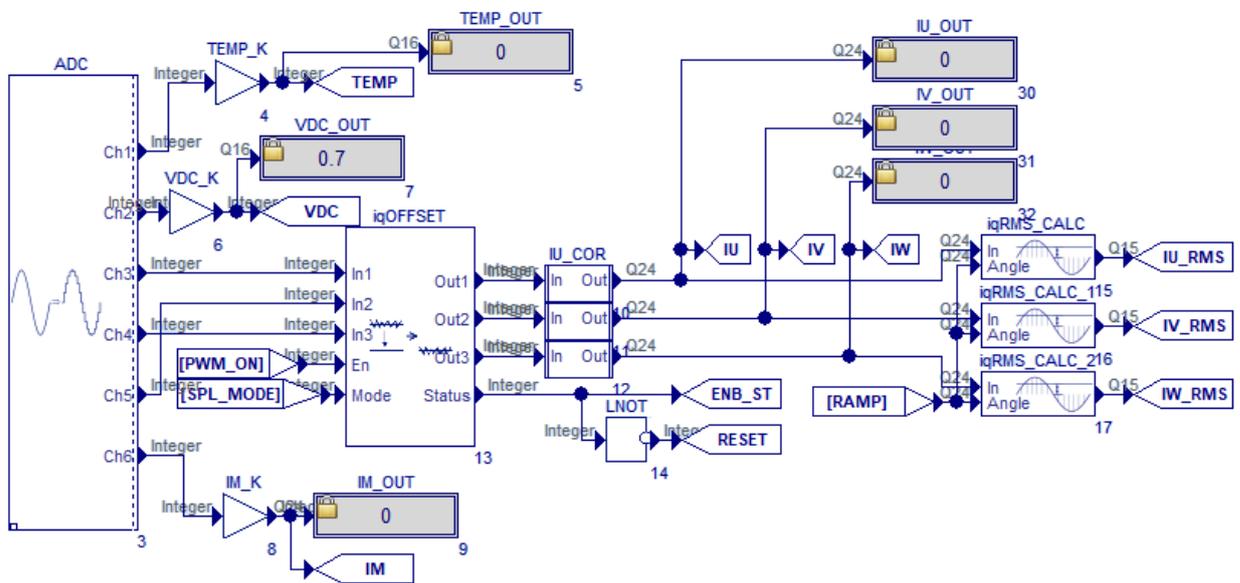


Рисунок 10.2 – Схема получения и обработки сигналов с АЦП

Сигналы поступают с АЦП, в масштабе абсолютных единиц и записываются в ячейки памяти. Программа верхнего уровня вычитает значения действующего тока.

Частота обновления рассчитанного значения действующего тока зависит от частоты измерения тока.

10.2 Контур положения

Контур положения может работать без обратной связи или по сигналу с датчика положения.

Работа без обратной связи реализована по счётчику микрошагов – после выполнения заданного числа шагов, управление останавливается с током удержания.

Для отладки режима позиционирования использовался датчик ЛИР-ДА159Б.001ПС. Прохождение заданного положения в заданное время с заданной скоростью, с соблюдением ограничений по первой производной от скорости (ускорения) реализуется с помощью линейного задатчика интенсивности.

Сигнал обратной связи по положению, полученный по интерфейсу SPI, замыкается на сигнал, получаемый с датчика ЛИР. С помощью ПИ-регулятора отрабатывается задание. Позиционный режим реализуется в подсистеме Position_loop (см. рисунок 10.3).

На выходе регулятора положения формируется сигнал задания частоты.

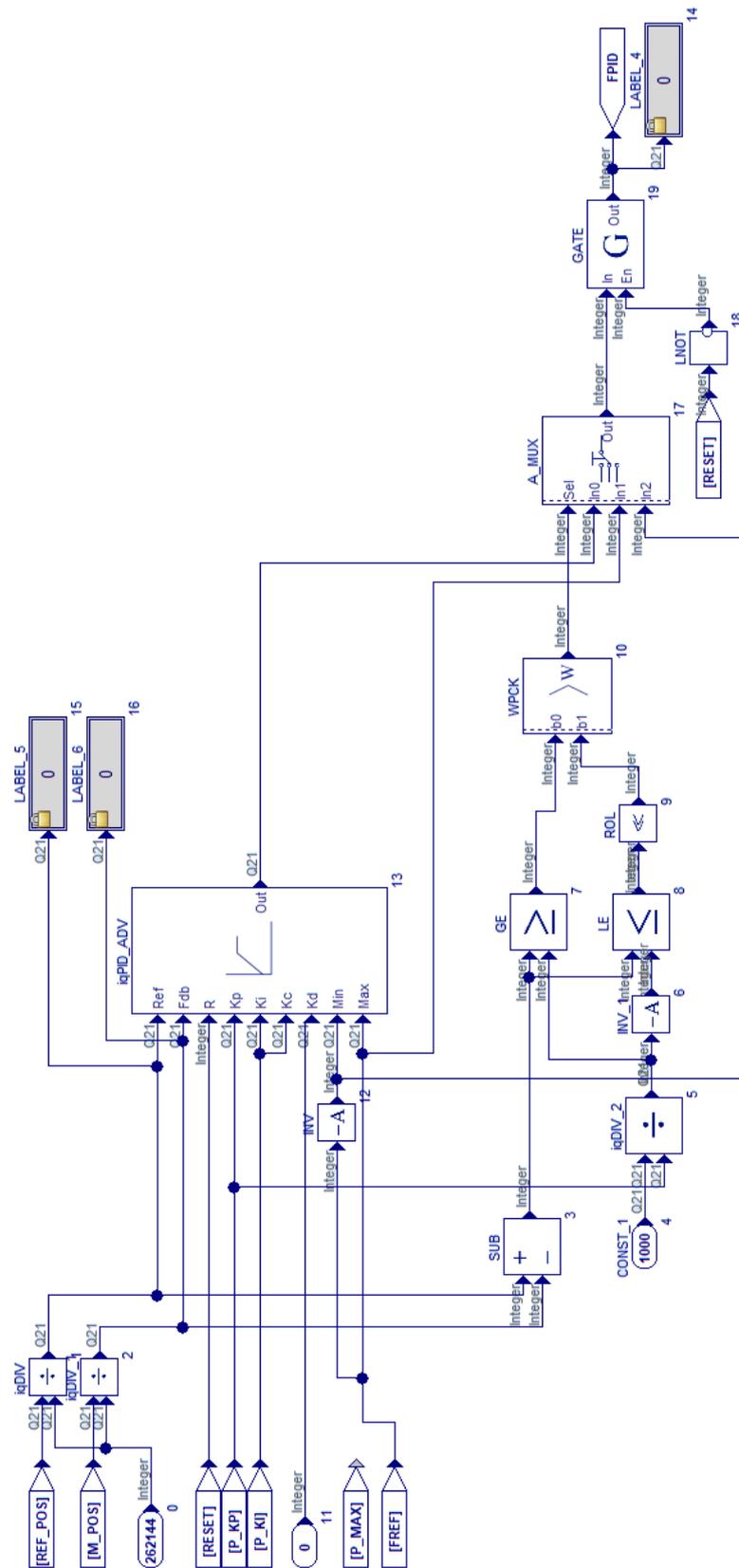


Рисунок 10.3 – Подсистема регулирования положения

11. Разработка механического стенда

Функциональная схема механического стенда имеет следующий вид:



Рисунок 11.1 – Функциональная блок-схема механического стенда

Стенд изготавливался с возможностью работы в вертикальном и горизонтальном положении.

Была разработана следующая конструкция испытательного стенда:

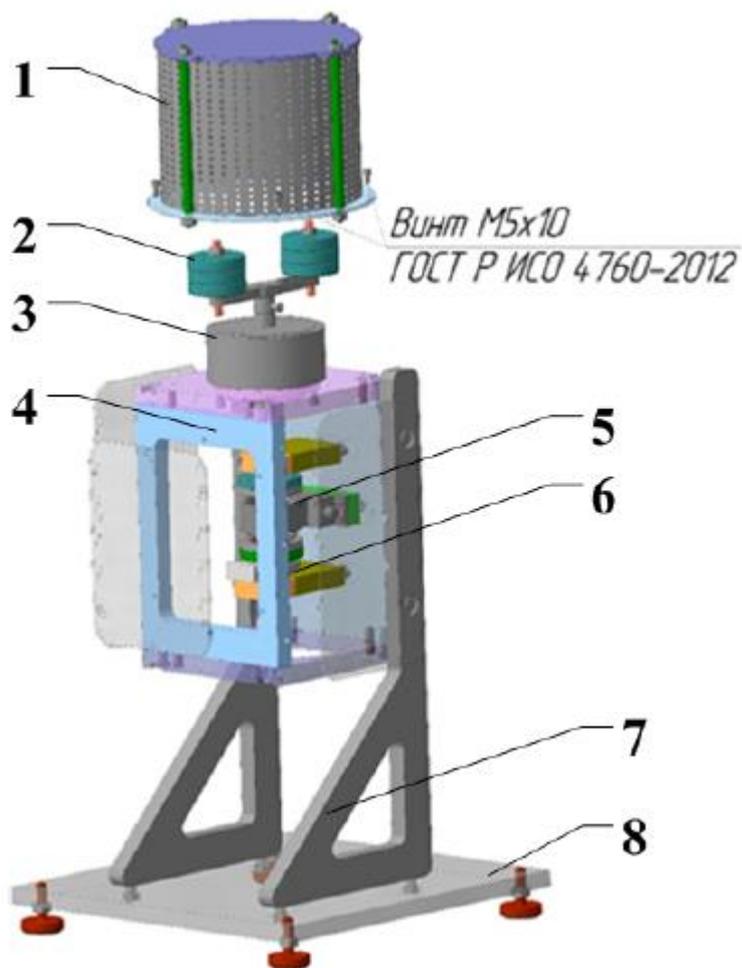


Рисунок 11.2 – Механический стенд в сборке

На рисунке 11.2 следующие обозначения:

- 1 – Защитный кожух;
- 2 – Инерционная нагрузка;
- 3 – Гистерезисная муфта;
- 4 – Корпус с защитными экранами;
- 5 – Датчик момента;
- 6 – Абсолютный датчик положения;
- 7 – Опоры;
- 8 – Плита.

Стенд может быть установлен в горизонтальном положении:

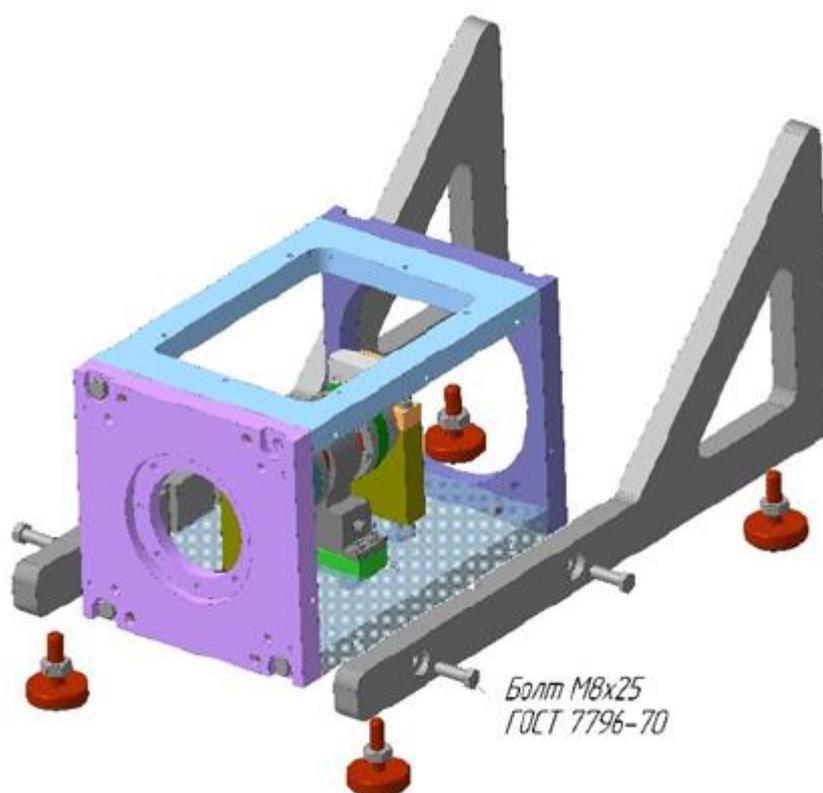


Рисунок 11.3 – Сборка стенда в горизонтальном положении

В стенде предусмотрена возможность установки четырех гистерезисных муфт, для каждой из которых изготовлен соответствующий фланец, имеющий гравировку с обозначением муфты.

Для осуществления момента нагрузки были применены гистерезисные муфты немецкой фирмы Мобас. Используется 4 модели муфт для реализации нагрузочного коридора для разных типов двигателей. Ниже, на рисунке 11.4, представлен рассчитанный график зависимости создаваемого момента в зависимости от тока муфты Мобас 140М-2 DS.

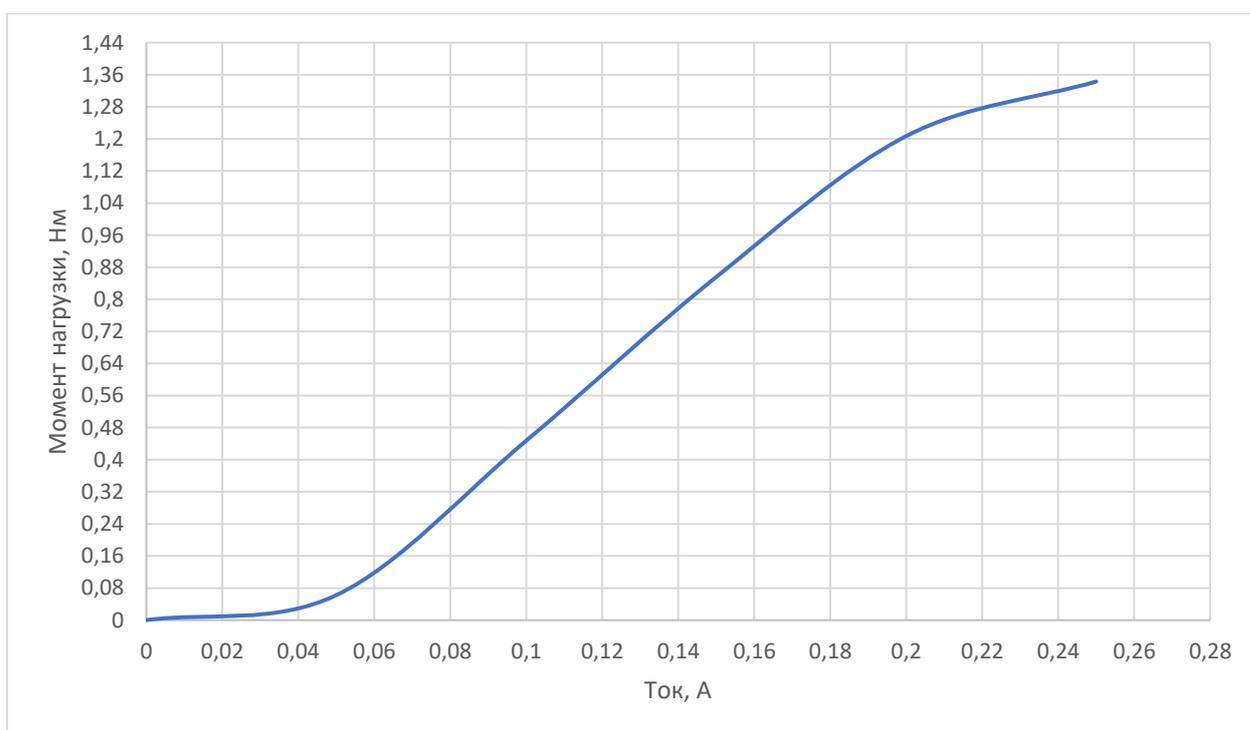


Рисунок 11.4 – Зависимость момента нагрузки от тока муфты Мобас 140М-2 DS.

Помимо данной муфты, в линейку муфт входят модели 20М-2 DS, 50М-2 DS и 250М-2 DS. Для муфт 20М, 50М, 140М изготовлено по паре разрезных переходников на диаметр 12 мм. Фланцы 20М и 50М крепятся к корпусу винтами М6х20 сверху; фланцы 140М и 250М винтами М6х16 – снизу.

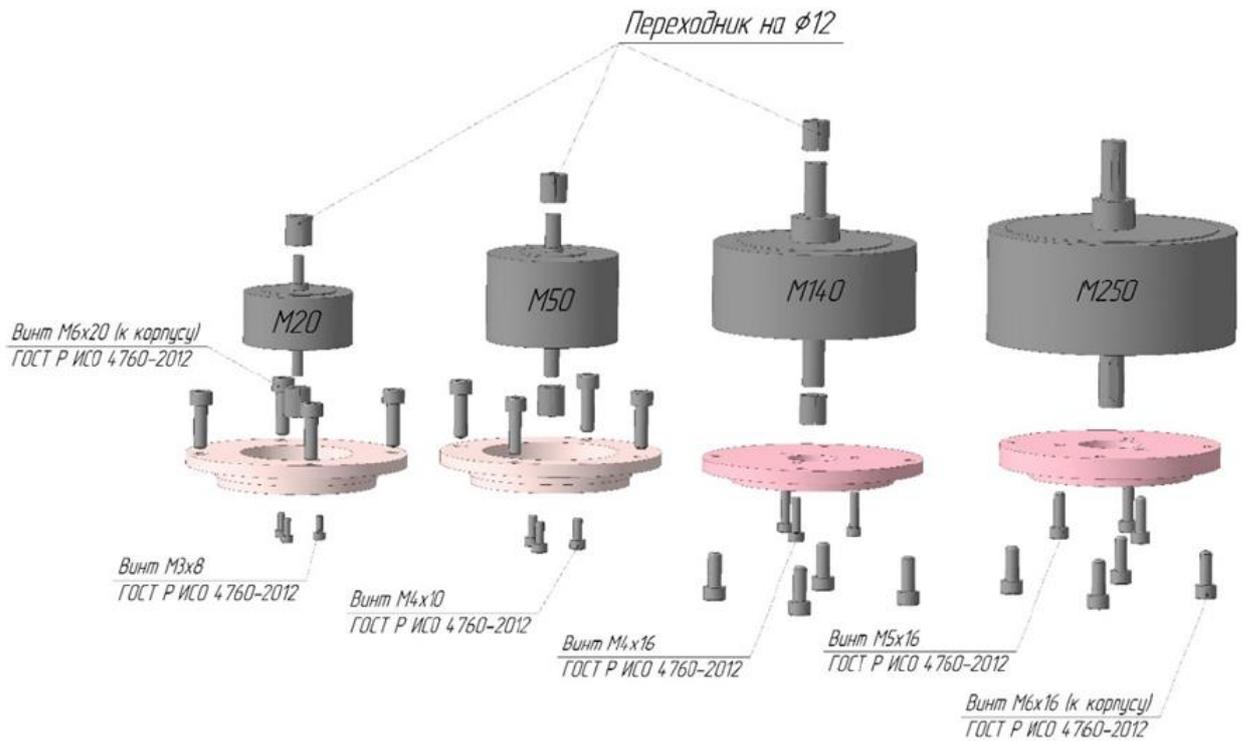
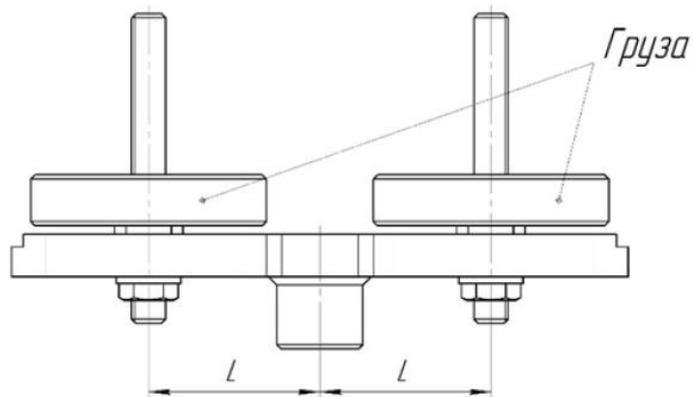


Рисунок 11.5 – Линейка нагрузочных гистерезисных муфт

Инерционная нагрузка регулируется расстоянием L до оси вращения и количеством грузов.



Момент инерции, кг \times м ²	Расстояние L до оси, мм	Количество грузов на каждой оси, шт.
1×10^{-3}	40	1
2×10^{-3}	58	1
5×10^{-3}	56	3
1×10^{-2}	47	4

Рисунок 11.6 – Параметры инерционной нагрузки

Датчиком момента выбран датчик М40 производства белорусской фирмы ООО ТИЛКОМ. Данный датчик является фланцевым и подходит для измерения крутящего момента как на упор, так и при вращении вала. Максимальный нагрузочный момент, который может выдать мощнейшая муфта из выбранных ранее – 2,3 Нм. Для реализации снятия моментных характеристик выбирается модель датчика М40-3. Максимальный крутящий момент данной модели равен 3 Нм, а максимальная частота вращения равна 20000 об/мин.

Датчика положения вала двигателя был использован угловой абсолютный энкодерный датчик Renishaw серии RESOLUTE. Преимуществом данного датчика является отсутствие момента сопротивления при вращении, поскольку датчик состоит из отдельного кольца с разметкой, которое встраивается во вращательную систему, и лазерного приемника, который устанавливается без механической связи с кольцом на определенном расстоянии от него. Был выбран датчик с разрядностью в 18 бит. Точность такого датчика составляет 262144 метки на оборот. В пересчете на угловые секунды точность составляет 4,94 угловых секунды.

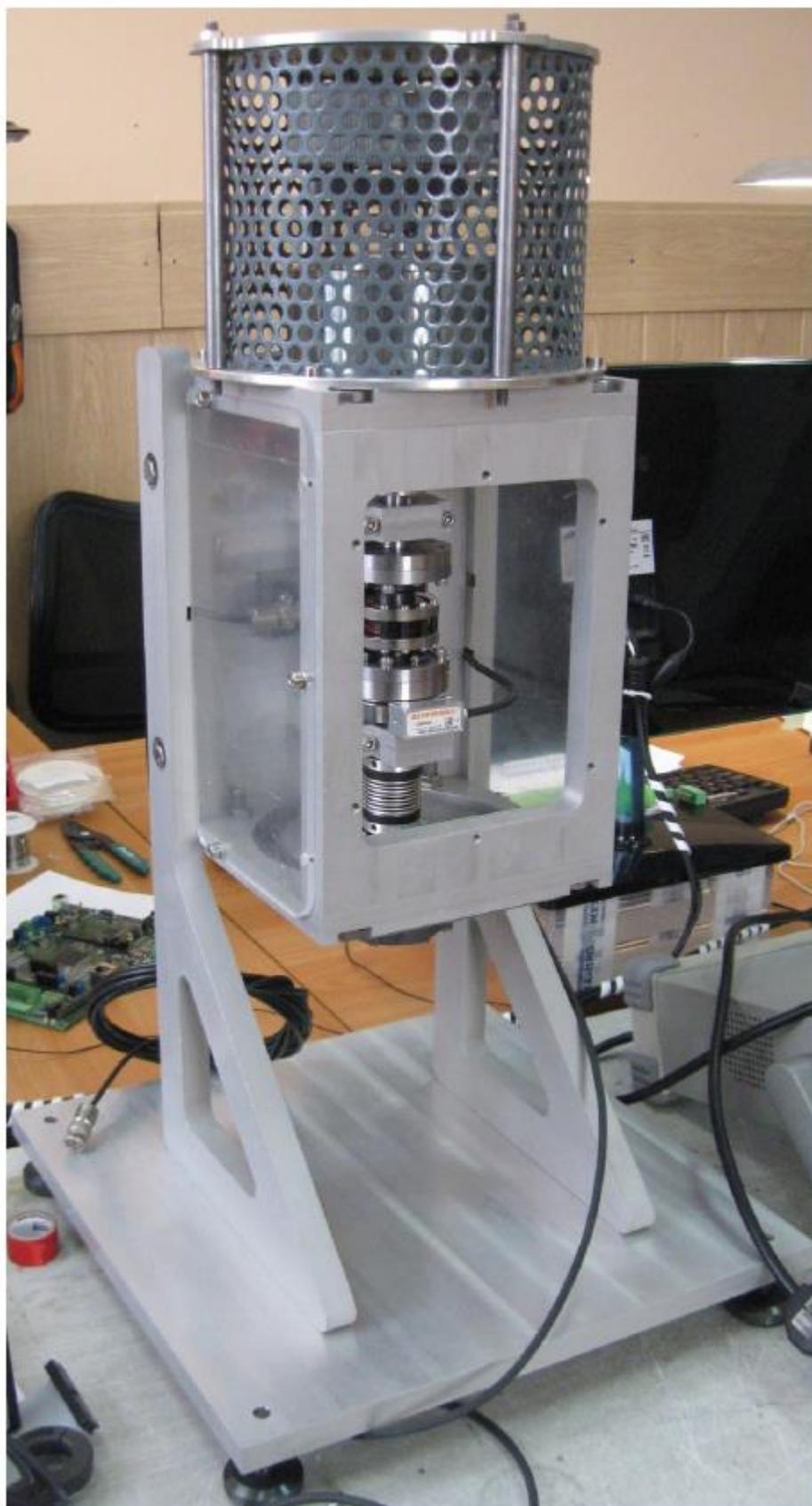


Рисунок 11.7 – Фотография станда

12. Разработка внутреннего ПО для КПА ЭД

Так как на предыдущем этапе макетирования был применён модуль разработчика MBS-K1921BK01T, разработанное внутреннее ПО было перенесено на новый разработанный макет со следующими изменениями:

Настройки драйверов:

- изменены настройки для драйверов АЦП, так как были использованы другие каналы;
- добавлено управление дополнительными дискретными выводами, отвечающими за переключения между основным и резервными обмотками, авария модуля, сброс аварии КЗ, разрешение ШИМ.

Для удобства дальнейшей разработки и отладки ПО были выполнены следующие изменения внутреннего ПО:

- алгоритм формирования режимов коммутации был реализован в виде функции на языке С;
- был разработан виртуальный пульт управления;
- разработан алгоритм управления гистерезисной муфтой и автоматическое размагничивание;

Реализованы следующие дополнительные алгоритмы:

- контур положения;
- алгоритм вычисления действующего значения тока;
- линейный датчик интенсивности;
- включение отдельного задания амплитуд токов в фазах;
- работа по диаграмме с пятью участками.

Для сопряжения внутреннего ПО с внешним ПО были распределены адреса протокола ModBusRTU.

3.1 Используемые каналы АЦП

Были использованы следующие каналы АЦП:

Ch1: Ch2_ADC1 – ток А

Ch2: Ch8_ADC4 – ток В

Ch3: Ch10_ADC5 – ток С

Ch4: Ch12_ADC6 – ток ГМ

Ch5: Ch14_ADC7 – температура в корпусе

Ch6: Ch20_ADC10 – напряжение DC

Ch7: Ch22_ADC11 – напряжение на драйверах

Каналы сигналы, требующие оцифровки, были разведены при создании печатной платы макета на различные физические АЦП, реализованные в применяемом контроллере. Это позволяет исключить взаимное влияние каналов друг на друга.

3.2 Применяемые дискретные входы/выходы

PH2 – дискретная ножка сигнализации КЗ в стойке. Если на выходе драйвера дискретной ножки появится 1, то произошло аппаратное КЗ в стойке.

GP0 – сброс аварии КЗ.

PG11 – разрешение формирования ШИМ.

13.Проведение испытания КПА ЭД

Макет выполнен частично на импортной элементной базе и предназначен для отладки решений с отечественной элементной базой. Из отечественной элементной базы первоначально применён только процессор K192BK01T. В процессе отладки решений - импортные элементы заменяются на отечественные. По результатам сравнения принимается решение, что полученные результаты с отечественной элементной базой не хуже, чем с импортной.

При получении готовой платы из пайки были проведены следующие мероприятия:

1) Визуальный осмотр. При визуальном осмотре брака при выполнении пайки не выявлено. Все элементы установлены правильно.

2) Запуск источника питания. Проверка выдаваемых уровней напряжения. Источник питания работает, заложенной мощности хватает для питания процессорной платы и силовой.

3) Проверка аналоговых и цифровых цепей.

4) Проверка силового канала. Для проверки силового канала использовалась RL нагрузка. Коротких замыканий при работе платы не было выявлено. Монтаж элементов был выполнен корректно.

5) Проверка работы интерфейсов связи: Ethernet, RS-485 (получение сигнала с датчика момента), SSI (422) получение сигнала с датчика положения.

6) Настройка цепи управления гистерезисной муфты.

После проведения отладки аппаратной части, была произведена отладка программно-аппаратной части:

1) Проверка штатного программатора на процессорной плате.

2) Проверка интерфейса RS-485 по протоколу MODBUS_RTU.

- 3) Проверка интерфейса Ethernet по протоколу MODBUS_RTU TCP IP.
- 4) Настройка аналого-цифрового преобразователя, для получения сигнала тока с наименьшим уровнем помех.
- 5) Настройка работы по прерыванию АЦП.
- 6) Настройка драйверов ШИМ в программе нижнего уровня.
- 7) Проверка алгоритмов работы программного обеспечения нижнего уровня.
- 8) Настройка контуров тока.
- 9) Настройка контура положения.
- 10) Проверка связи по RS-485 с программным обеспечением верхнего уровня. Протокол работы MODBUS_RTU.

13.1 Настройка ШИМ

Управление силовыми ключами выполняется алгоритмом широтно-импульсной модуляции. В программном обеспечении необходимо настроить:

Id - Номер пары ключей в стойке.

CounterMode - Режим счёта таймера ШИМ.

Frequency - Частоту ШИМ, Гц.

OutActionA - Событие включения/отключения ключей при сравнении.

DbPolarity - Уровень срабатывания ключей. В аппаратной части применено включение транзистора низким уровнем сигнала.

SyncPhase - Режим синхронизации.

DeadTime - Величина временной паузой между включением/отключением силовых ключей в стойке. Задаётся в микросекундах.

SocAMode - Режим запуска оцифровки АЦП.

Для формирования двуполярного тока через фазу двигателя необходимо управлять синхронно ключами в диагоналях H-моста. При управлении верхним ключом одной стойки и ключом нижней стоки по диагонали - ток будет течь в одну сторону, при смене диагонали ключей в другую.

Опишем процесс настройки драйверов ШИМ для H-моста фазы А.

Настройки для первой стойки:

Id = PWM0 - Номер пары ключей в стойке.

CounterMode = 2: Up/Down - Режим счёта таймера ШИМ.

Frequency = 5000 - Частоту ШИМ, Гц.

OutActionA = 0x60 - Событие включения/отключения ключей при сравнении. В настройках выбрано CAU_SET – включение верхнего ключа в стойке по событию сравнения таймера с значением на входе CMPA драйвера ШИМ при счёте вверх (UP), CAD_CLEAR – выключение верхнего ключа по событию сравнения таймера с значением на входе CMP драйвера ШИМ при счёте вниз (DOWN).

DbPolarity = 1 : Active low complementary - Уровень срабатывания ключей. В аппаратной части применено включение транзистора низким уровнем сигнала.

SyncPhase = 2: Master - Режим синхронизации.

DeadTime = 1 - Величина временной паузой между включением/отключением силовых ключей в стойке. Задаётся в микросекундах.

SocAMode = 2: CTR_PRD - Режим запуска оцифровки АЦП.

Настройки для второй стойки:

Id = PWM1 - Номер пары ключей в стойке.

CounterMode = 2: Up/Down - Режим счёта таймера ШИМ.

Frequency = 5000 - Частоту ШИМ, Гц.

OutActionA = 0x90 - Событие включения/отключения ключей при сравнении. В настройках выбрано CAD_CLEAR – выключение верхнего ключа в стойке по событию сравнения таймера с значением на входе CMPA драйвера ШИМ при счёте вверх (DOWN), CAU_SET – включение верхнего ключа по событию сравнения таймера с значением на входе CMPA драйвера ШИМ при счёте вверх (UP).

DbPolarity = 1 : Active low complementary - Уровень срабатывания ключей. В аппаратной части применено включение транзистора низким уровнем сигнала.

SyncPhase = 2: Master - Режим синхронизации.

DeadTime = 1 - Величина временной паузой между включением/отключением силовых ключей в стойке. Задаётся в микросекундах.

SocAMode = 2: CTR_PRD - Режим запуска оцифровки АЦП.

Приведённая настройка позволяет формировать напряжение с помощью ШИМ пропорционально изменяющемуся сигналу на входе CmpA драйвера в диапазоне от -1 (максимальное отрицательное напряжение) до 1 (максимально положительное напряжение).

Проверка работы модуля ШИМ проводилась по осциллографу.

13.2 Настройка АЦП для оцифровки сигналов с датчиков Холла

Аналого-цифровое преобразование (АЦП) применяется для получения токов трёх фаз и тока в цепи гистерезисной муфты.

На силовой плате штатно установлены датчики Холла для получения сигналов в фазах двигателя. Установка датчиков тока в диагональ Н-моста позволяет получить двуполярный сигнал.

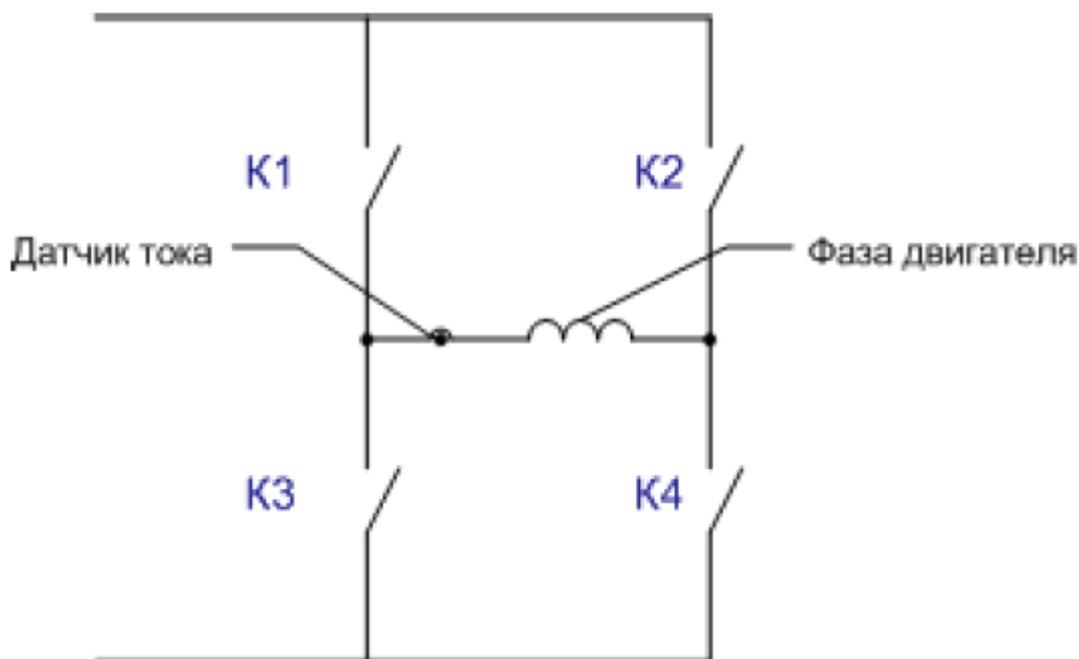


Рисунок 13.1 – Установка датчика Холла

Так как для формирования регулируемого напряжения применяется алгоритм широтно-импульсной модуляции – процесс оцифровки необходимо выполнять особым образом: так, чтобы АЦП производило оцифровку в момент установившегося значения тока, протекающего через силовой транзистор. Если производить оцифровку в момент коммутации силового ключа, в полезном оцифрованном сигнале будут присутствовать шумы.

Для настройки АЦП применяются следующие настройки.

ChanCount - Каналы к которым подключен полезный сигнал и которые будут оцифровываться.

Resolution - Возможно выбрать между режимами оцифровки 12 битный или 10 битный.

Channels - Выбор каналов для оцифровки.

Prescaller - Пауза между оцифровками.

Average - Возможно установить оцифровку с усреднением.

SeqTrigger - Выбор триггера для запуска оцифровки.

SeqDelay - Задержка после оцифровки в тактах работы процессора.

IntEnable - Разрешение прерывания по АЦП.

В процессе отладки был произведён выбор оптимальных настроек для оцифровки. При следующих параметрах оцифровки получены не удовлетворительные результаты:

ChanCount = 5 - Каналы к которым подключен полезный сигнал и которые будут оцифровываться.

Resolution= 12 - Возможно выбрать между режимами оцифровки 12 битный или 10 битный.

Channels = 0x505504 - Выбор каналов для оцифровки.

Prescaller = 3 - Пауза между оцифровками.

Average = 0 - Возможно установить оцифровку с усреднением.

SeqTrigger = PWM0 - Выбор триггера для запуска оцифровки.

SeqDelay = 50 - Задержка после оцифровки в тактах работы процессора.

IntEnable = Нет - Разрешение прерывания по АЦП.

Результаты работы оцифрованного синусоидального сигнала амплитудой 20 мА, представлены на рисунке 13.2.

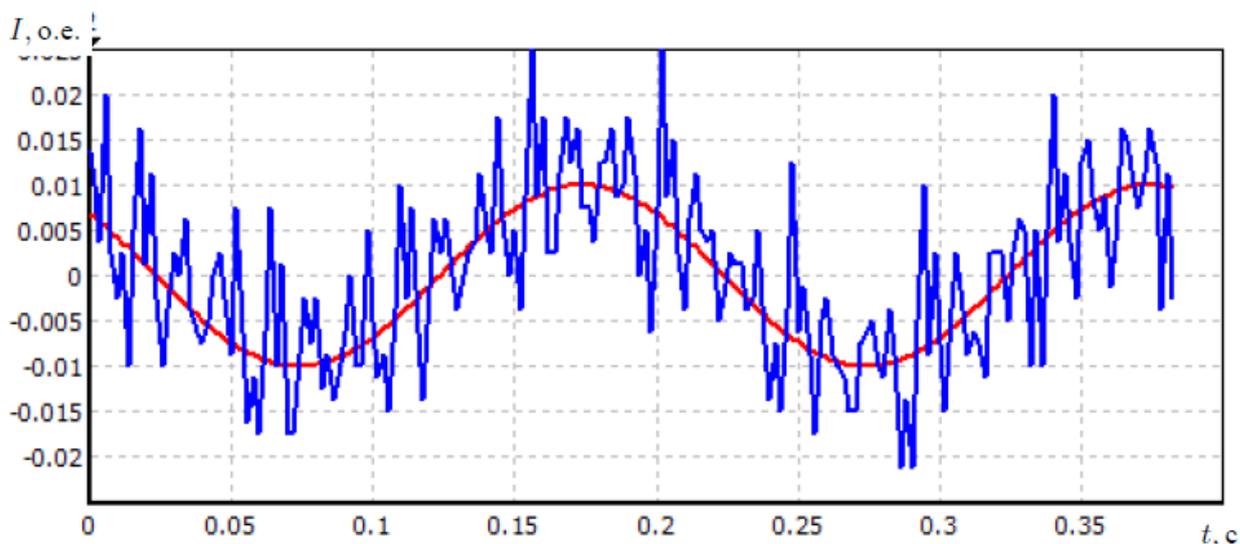


Рисунок 13.2 – Влияние шума на полезный сигнал

Видно, что величина шума значительно превышает полезный сигнал. Работа системы управления при замыкании на сигнал обратной связи с таким уровнем шумов будет невозможна.

Наличия такого уровня шума обуславливается попаданием процесса оцифровки на момент коммутации силового ключа. При данных испытания аппаратное прерывание выполнялось с помощью системного таймера с частотой 5000 Гц.

С целью устранения выявленного эффекта было задействовано прерывание процессора K192BK01T по завершению оцифровки.

При таком решении происходит следующее:

- процесс оцифровки запускается по событию, которое генерируется PWM0;
- происходит процесс оцифровки выбранных каналов и формируется флаг окончания оцифровки;
- по флагу окончания оцифровки запускается прерывание АЦП, происходит выполнение программы. Сигнал токов не включает шум от попадания оцифровки на момент коммутации силовых ключей.

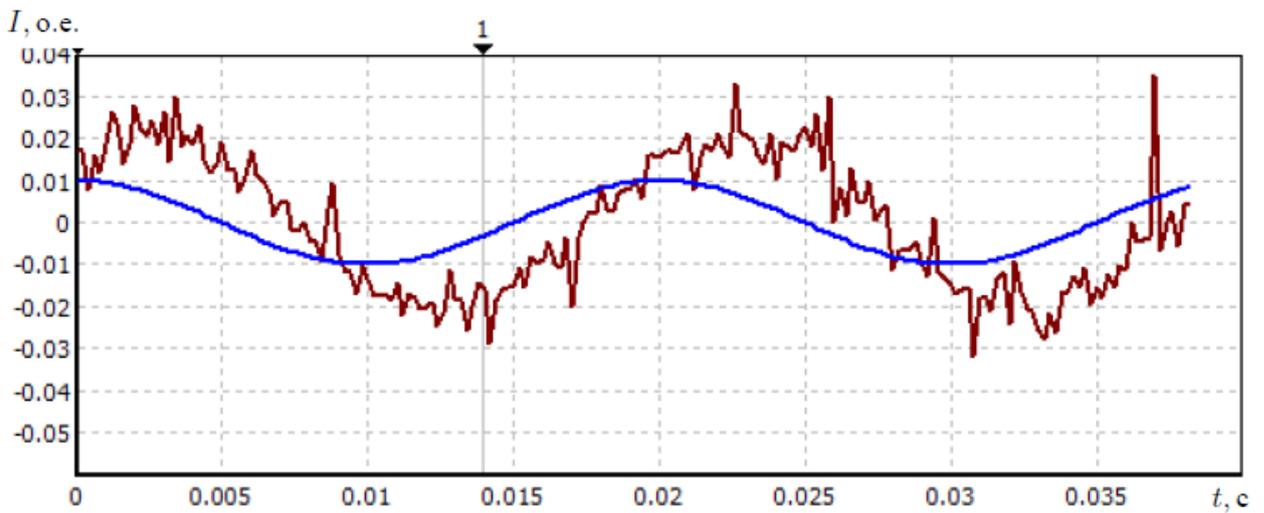


Рисунок 13.3 – Полезный сигнал до проведения настройки прерывания

В полученном результате также наблюдается шум. Для уменьшения уровня шума применим настройку усреднения для блока АЦП, тогда получим следующий результат:

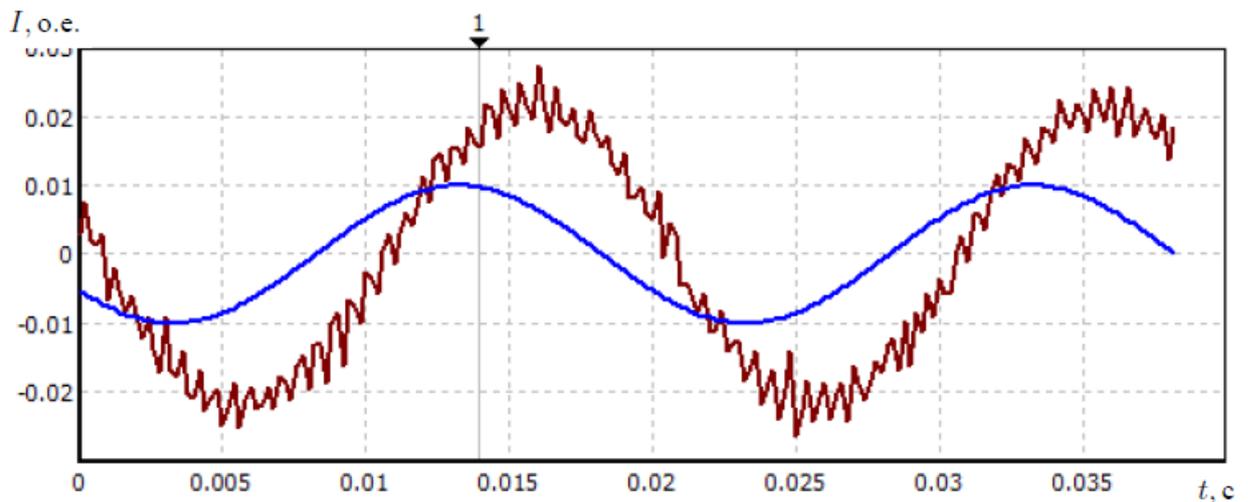


Рисунок 13.4 – Полезный сигнал после проведения настройки прерывания

На рисунке 13.4 видно уменьшения величины шума при усреднении в 8 отсчётов.

В итоге получены следующие настройки для оцифровки с датчиков Холла:

ChanCount = 5 - Каналы к которым подключен полезный сигнал и которые будут оцифровываться.

Resolution = 12 - Возможно выбрать между режимами оцифровки 12 битный или 10 битный.

Channels = 0x505504 - Выбор каналов для оцифровки.

Prescaller = 3 - Пауза между оцифровками.

Average = 3 - Усреднение 3: 8 Samples.

SeqTrigger = PWM0 - Выбор триггера для запуска оцифровки.

SeqDelay = 50 - Задержка после оцифровки в тактах работы процессора.

IntEnable = Да - Разрешение прерывания по АЦП.

13.3 Настройка АЦП для оцифровки сигналов шунта в отрицательной шине

В предлагаемой отечественной элементной базы микросхем, для получения развязки и усиления сигналов с датчиков Холла. Поэтому в разрабатываемом устройстве предлагается использовать измерение тока по шунту подключенному к нижним ключам и шине постоянного тока.

Особенностью измерения тока по шунту в отрицательной шине является протекание по шунту только положительного тока. Так как сигнал тока может быть положительным и отрицательным необходимо применить следующее решение.

Запускать оцифровку два раза за период ШИМ. При задании на входе ШИМ от 0 до 1 забирать сигнал с одного канала АЦП, при задании на входе ШИМ в пределах от минус 1 до 0 забирать сигнал с другого канала АЦП.

Изменить алгоритм работы АЦП и добавить возможность оцифровки тока два раза за период. В результате введена настройка DoubleRate . При

установки активным этого параметра оцифровка тока происходит два раза за период ШИМ. Сигнал тока оцифрованного в первый раз выдаётся на выход драйвера, назначенный в настройках. Сигнал оцифрованный второй раз выдаётся на следующий выход текущий канал плюс число каналов.

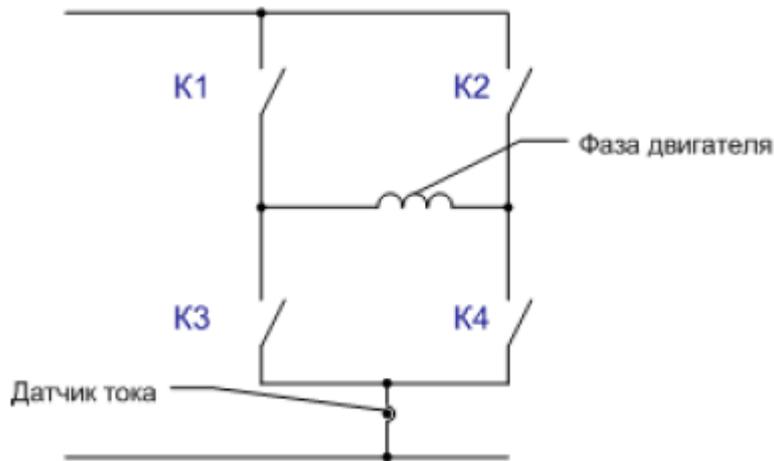


Рисунок 13.5 – Снятие сигнала с датчика установленного в нижней стойке силовых ключей

13.4 Получение сигнала тока с гистерезисной муфты

Для снятия тока с гистерезисной муфты применяется шунт. Требуемый ток для формирования момента должен изменяться от 0 до 250 мА.

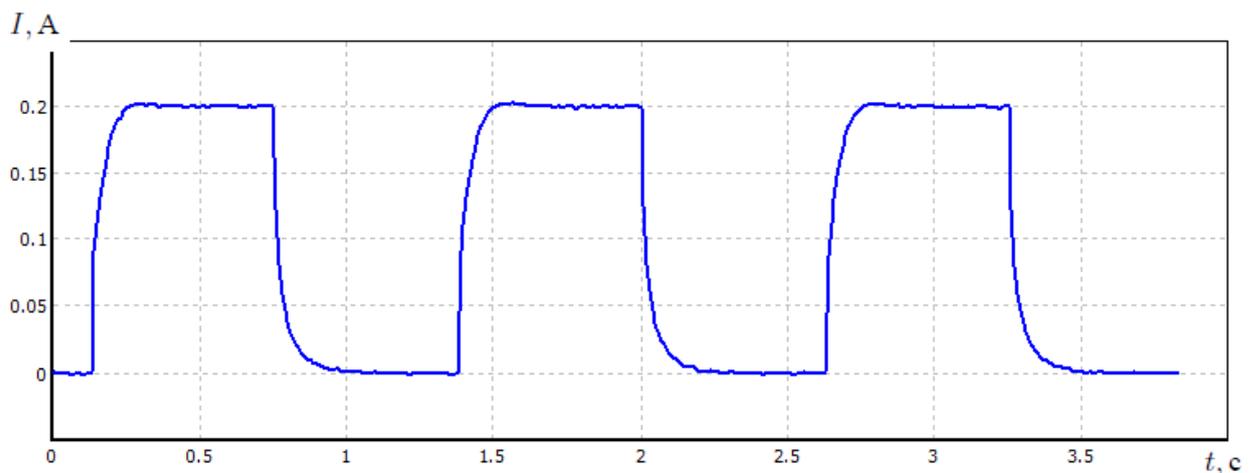


Рисунок 13.6 – Оцифровка тока в ГМ

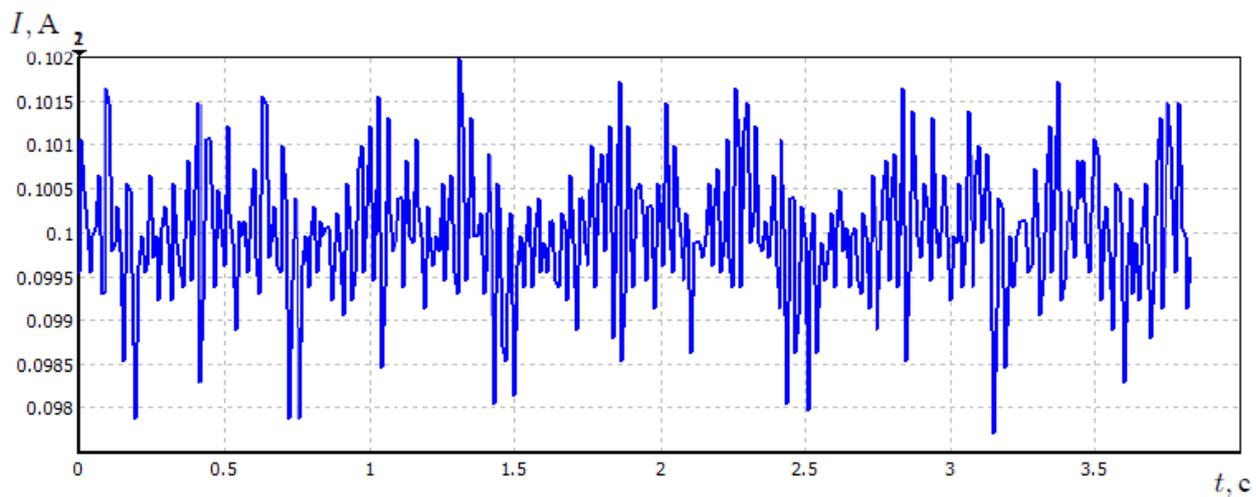


Рисунок 13.7 – Величина шума в сигнале тока с ГМ

Полученный сигнал тока позволяет сформировать ток до 250 мА с точностью до 5 мА.

14.Корректировка алгоритмов управления

14.1 Обработка сигналов тока с АЦП

Отладка алгоритмов управления была проведена на предыдущем этапе макетирования.

Корректировка алгоритмов управления на данном этапе вызвана особенностью получения сигналов тока.

Оцифровка токов производится два раза за период ШИМ. Положительный ток оцифровывается по PWM0 в состоянии PRD. Отрицательный ток оцифровывается по PWM1 в состоянии ZERO. Для объединения положительного и отрицательного результата оцифровки необходимо применить следующую схему:

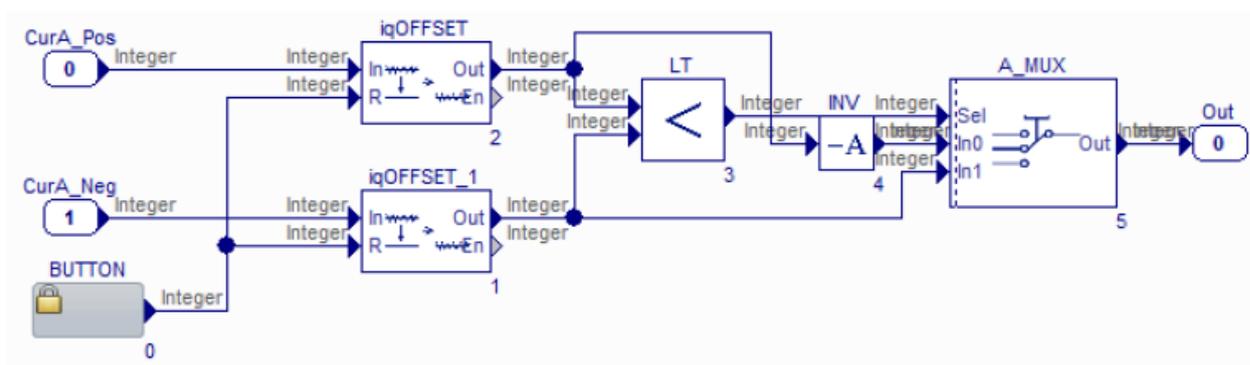


Рисунок 14.1 – Схема для получения сигнала тока

На рисунке 14.1 показан алгоритм обработки двух сигналов тока и получение результирующего. Блоки iqOFFSET компенсируют постоянную составляющую в сигнале. Блок LT сравнивает два сигнала и в зависимости от сравнения (какой сигнал меньше) на выходе A_MUX выдаётся соответствующая знаку тока полуволна.

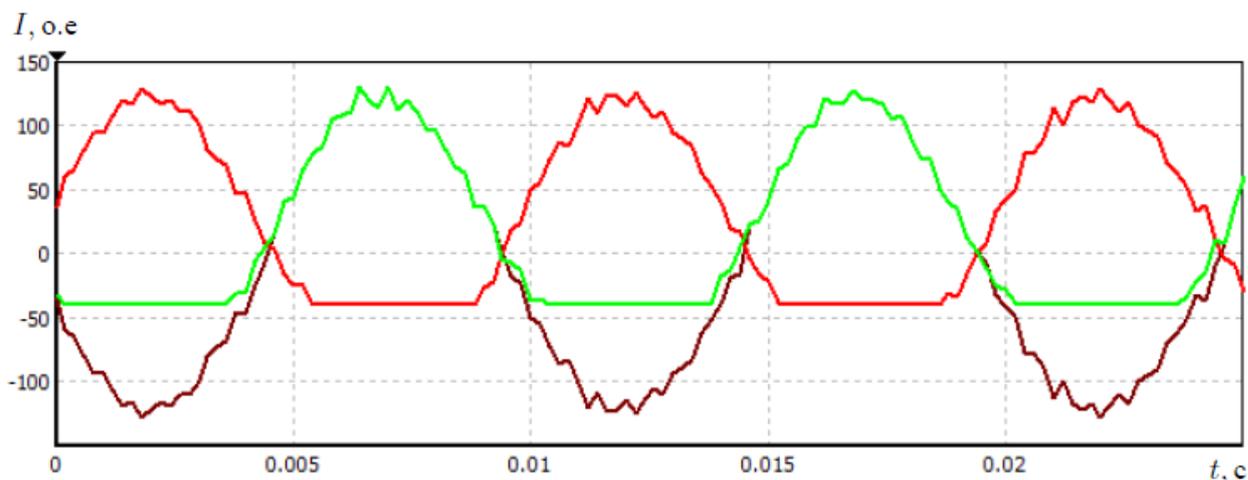


Рисунок 14.2 – Объединение сигналов тока

На рисунке 14.2 следующие обозначения: 1 – объединённый сигнал токов, 2 – положительная полуволна, 3 – отрицательная полуволна. Масштаб тока в размерности отсчётов АЦП.

14.2 Калибровка тока

После получения удовлетворительного качества сигнала тока была проведена калибровка датчиков тока. Для выполнения калибровки были проведены следующие действия:

- 1) RL нагрузку подключить к макету через поверенный амперметр.

В проведении экспериментов использовался мультиметр U3401A Agilent Technologies: Диапазон измерения тока 0,001 до 10 А, диапазон измерения частоты от 30 Гц до 500 кГц.

- 2) Масштаб тока в ПО в единицах с блока АЦП.

Единицы блока АЦП определяются количеством бит АЦП (для K1921BK01 двенадцать бит) и величиной падения напряжения на шунте. Выход с блока АЦП может изменяться в диапазоне от 0 до 2048. Данный диапазон нужно перевести в мА в формате 7 бит на целую часть и 24 бит на дробную часть числа.

3) Снять серию экспериментов и заполнить таблицу. Записывать показания с амперметра и соответствующее ему значение показания с блока АЦП.

4) Эксперименты снимать для различной скважности ШИМ. Для положительного тока от 0 до 1 с шагом 0,1. Для отрицательного тока от 0 до минус 1 с шагом 0,1.

5) По полученной таблице вычислить средний коэффициент преобразования.

6) Полученный коэффициент умножить на 224.

7) Целую часть итогового коэффициента записать в параметр Gain блока iqOFFSET.

8) Проверить соответствие масштабированного тока показаниям амперметра на всём диапазоне тока. При необходимости провести корректировку полученного коэффициента.

График полученный по результатам экспериментов представлен на следующем рисунке. Видно, что график линейный, что говорит о линейности датчика тока.

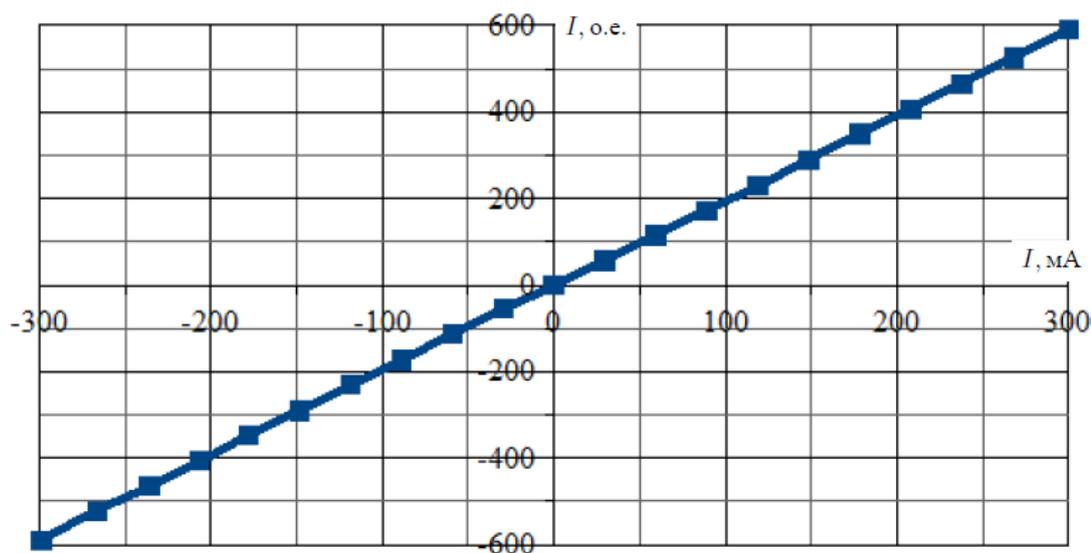


Рисунок 14.3 – Основные элементы главного окна

15. Проведение испытаний при помощи разработанного макета

Испытания проводились при помощи разработанных составляющих контрольно-проверочной аппаратуры: блок управления двигателем, специализированный механический стенд с датчиками и нагрузочной муфтой и разработанным программным обеспечением.

Объектом испытаний является двигатель 14Ф151.3413-0, имитационную модель которого испытывали ранее.

Внешний вид интерфейса управления программного обеспечения представлен на рисунке 15.1. При помощи данного интерфейса можно полностью контролировать все протекающие процессы при испытаниях.

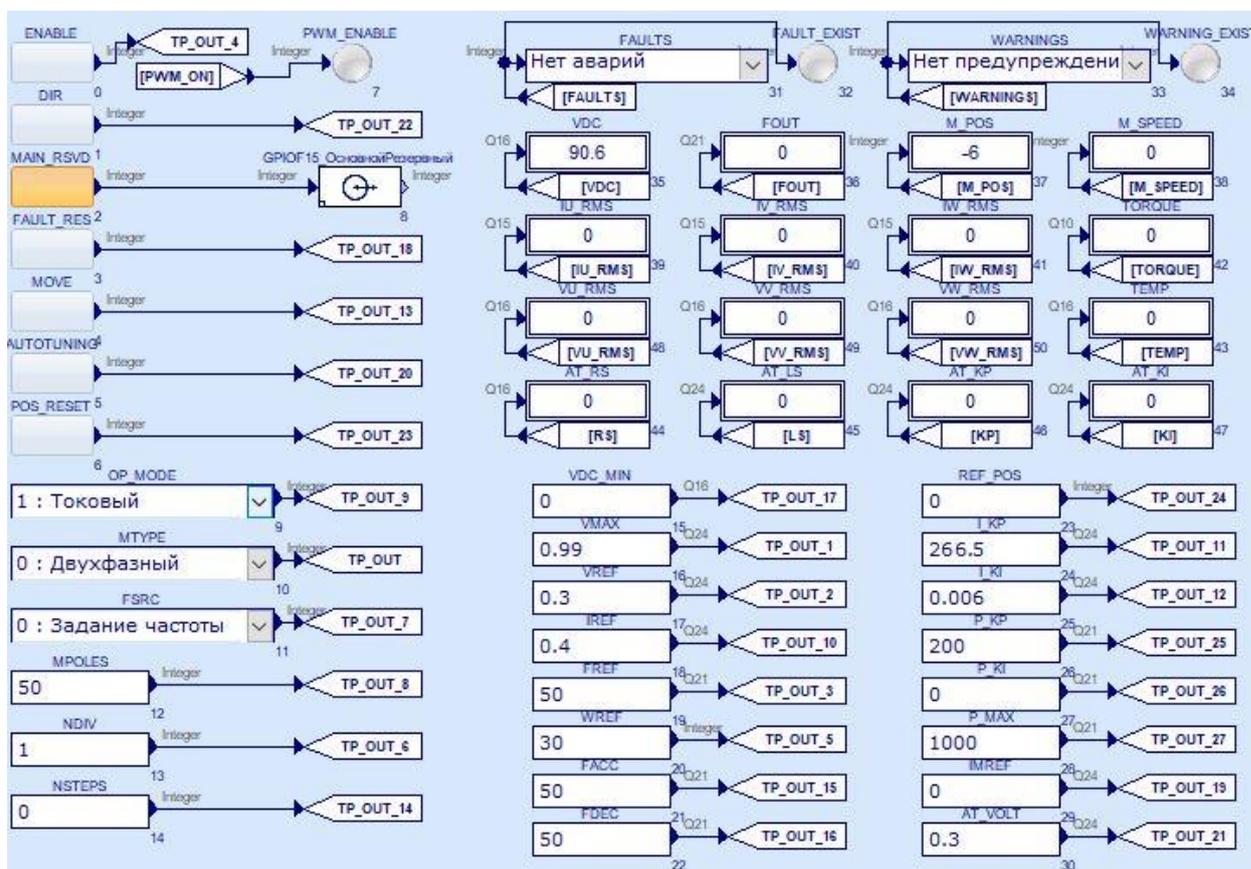


Рисунок 15.1 – Интерфейс пользователя сервисного программного обеспечения макета разработки.

Выставим параметры двигателя с учетом проведенных ранее расчетов.

Проведение испытаний имеет аналогичный алгоритм, как и при имитационном моделировании. Выставляем номинальные параметры двигателя, устанавливаем частоту токов шагового двигателя равной 5 Гц, дробление шага равным 1. Производим пуск двигателя. Дождемся установления скорости вращения вала. Производим подачу минимальной нагрузки при помощи гистерезисной муфты и постепенно увеличиваем ее. Фиксируем крайнее значение момента предшествующее выпадению двигателя из синхронизма. Повторять данное испытание до максимально возможной частоте тока двигателя. Провести аналогичное построение выходной характеристики при управлении двигателем в микрошаговом режиме. Полученные графики показаны на рисунке 15.2.

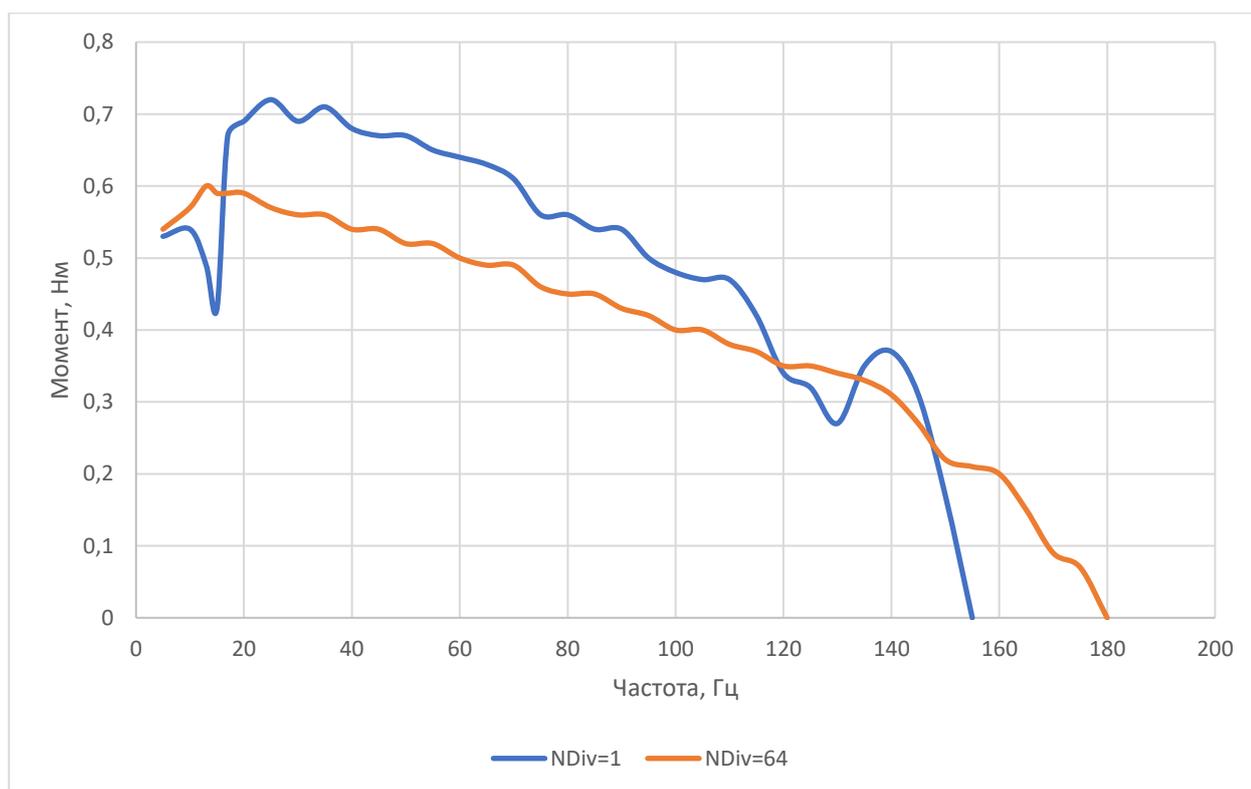


Рисунок 15.2 – Выходные характеристики двигателя 14Ф151.3413-0.

Полученные при имитационном моделировании графики имеют схожий характер кривых с полученными графиками при испытаниях на реальном объекте. Поведение характеристик зонировано также, как и при моделировании. Основным отличием графиков полученных при испытаниях

является уменьшенный коридор рабочих частот. Данное отличие можно связать с идеальностью математической модели объекта испытаний, в котором не учитываются неочевидные возмущающие факторы.

16. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность проектирования для космической отрасли определяется коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения исследования рынка, разработки технологии и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Задачами раздела являются:

- оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ;
- разработка устава научно-технического проекта;
- планирование процесса управления НТИ;
- структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок;
- определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

Применяться данная разработка может в космической отрасли, а также производители электрооборудования.

16.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Цель данной работы – провести исследования и произвести разработку испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией.

К задачам работы относится – поэтапная разработка конструкторской и технической документации, производство разработанного оборудования.

Разрабатываемое устройство необходимо для проведения испытаний. В первую очередь устройство необходимо производственным компаниям для подтверждения характеристик произведенной ими продукции и оценки качества этой продукции путем имитации реальных технических условий эксплуатации. К таким производственным компаниям можно отнести компании космической или военной отрасли.

Что бы провести анализ потребителей результатов данного исследования, необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

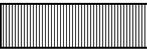
Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, **сегмент рынка** – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар. Сегментируем рынок контрольно-проверочной аппаратуры синхронных двигателей с электромагнитной редукцией (далее – СДЭР) по следующим критериям: отрасль применения, технические решения (таблица 16.1).

Таблица 16.1 – Карта сегментирования рынка

		Технические решения		
		Электро-магнитный тормоз	Тормозная нить	Источник момента
Отрасль	Предприятия космической и военной отрасли			
	Общепромышленные предприятия			

где:

разработки SUGAWA - 
 разработки НПФ Вектор - 

На основании показанной карты, можно сделать вывод, что целевым сегментом рынка можно считать разработки для использования в космической либо военной отрасли.

16.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

С помощью данного анализа конкурентных технических решений методом сравнения можно оценить сильные и слабые стороны рассматриваемых испытательных аппаратур СДЭР, чтобы наиболее обосновано установить задачи для дальнейшего проектирования. Чаще всего один вариант не может обладать сразу всеми техническими и экономическими показателями в высшей степени, поэтому данный анализ позволяет выбрать тот вариант, который в целом обладает наивысшей конкурентоспособностью.

Для того чтоб провести оценку конкурентоспособности нужно рассмотреть три вида наиболее конкурентоспособных решений:

- Испытательная аппаратура с использованием электромагнитного тормоза (№1 Таблица 16.2);
- Испытательная аппаратура с использованием тормозной нити (№2 Таблица 16.2);
- Испытательная аппаратура с использованием источника момента (№3 Таблица 16.2).

Сравнение характеристик выбранных типов испытательного оборудования представлено в оценочной карте (Таблица 16.2).

Таблица 16.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б ₁	Б ₂	Б ₃	К ₁	К ₂	К ₃
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
2. Удобство в эксплуатации	0,09	5	4	5	0,45	0,36	0,45
3. Помехоустойчивость	0,07	4	5	4	0,28	0,35	0,28
4. Энергоэкономичность	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
5. Надежность	0,06	5	5	4	0,3	0,3	0,24
6. Уровень шума	0,03	3	3	3	0,09	0,09	0,09
7. Безопасность	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
8. Функциональная мощность	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
9. Простота эксплуатации	0,05	4	5	2	0,2	0,25	0,1
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	5	3	4	0,2	0,12	0,16
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	5	4	5	0,2	0,16	0,2
3. Цена	0,09	3	4	5	0,27	0,36	0,45
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	5	4	2	0,35	0,28	0,14
5. Послепродажное обслуживание	0,03	5	4	3	0,15	0,12	0,09
6. Финансирование научной разработки	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
7. Срок выхода на рынок	0,03	4	4	5	0,12	0,12	0,15
8. Наличие сертификации разработки	0,04	5	3	4	0,2	0,12	0,16
Итого	1				4,61	3,95	3,9

Для проведения данного анализа сравнения проводится с двумя распространенными разработками:

- 1) Разработки фирмы SUGAWA;
- 2) Разработки НПФ Вектор.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Пример расчета конкурентоспособности:

$$K = 0,07 \times 5 = 0,35$$

В ходе результата анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод, что наибольшим преимуществом обладает испытательная аппаратура с использованием источника момента, так как она превосходит конкурентов по производительности, энергоэкономичности, надежности, безопасности и простоте обслуживания.

16.1.3 FAST-анализ

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат. Затраты возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством

конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

Проведение FAST-анализа предполагает шесть стадий:

1. Выбор объекта FAST-анализа;
2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
3. Определение значимости выполняемых функций объектом;
4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа. В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает испытательное оборудование для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом (таблица 16.3).

Таблица 16.3 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Кол-во деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Блок управления СДЭР	1	Блок управления нужен для запуска и управления током в обмотках двигателя	×		
Механический стенд	1	На механический стенд установлен испытуемый двигатель. Механический стенд обладает нагрузочными и	×		

		измерительными устройствами			
Источник питания	1	Подает регулируемое напряжение питания на установку		×	
Персональный компьютер	1	Используется для работы с интерфейсом программного обеспечения		×	
Камера	1	Применяется как устройство записи и транслирования испытаний в реальном времени			×

Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

На данной стадии, для оценки значимости функций, используем метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф.

На первом этапе построим матрицу смежности функции (таблица 16.4).

Таблица 16.4 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5
Функция 1	=	=	>	>	>
Функция 2	=	=	>	>	>
Функция 3	<	<	=	>	>
Функция 4	<	<	<	=	>
Функция 5	<	<	<	<	=

На втором этапе преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 16.5).

Таблица 16.5 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Итого

Функция 1	1	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 2	1	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	5
Функция 4	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3
						$\Sigma=25$

Стадия 4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования. С помощью применения нормативного метода оценим уровень затрат на выполнение каждой функции (таблица 16.6).

Таблица 16.6 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Блок управления СДЭР	1	Блок управления нужен для запуска и управления током в обмотках двигателя	-	3	65044,7	1500,5	66545,2
Механический стенд	1	На механический стенд установлен испытуемый двигатель. Механический стенд обладает нагрузочными и	-	3	58023	1050,0	59073

		измерительными устройствами					
Источник питания	1	Подает регулируемое напряжение питания на установку	-	2	31513,9	573,2	32087,1
Персональный компьютер	1	Используется для работы с интерфейсом программного обеспечения	-	2	41744,4	711,2	42455,6
Камера	1	Применяется как устройство записи и транслирования испытаний в реальном времени	-	1	1106,7	789,3	1896

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ. Отообразим информацию об объекте исследования в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 16.1).

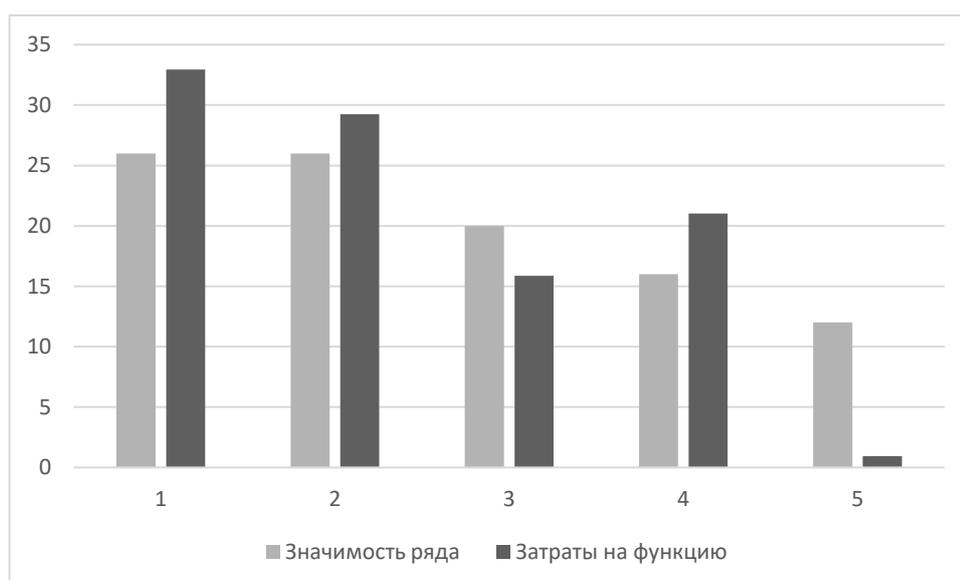


Рисунок 16.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них. Анализ приведенной выше ФСД показывает явное наличие рассогласования по функциям 1 и 3. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

Стадия 6. Оптимизация функций, выполняемых объектом. Список мероприятий для снижения затрат на единицу полезного эффекта:

- применение принципиально новых конструкторских решений;
- оптимизация технических параметров;
- оптимизация параметров надежности;
- применение новых техпроцессов, заготовок, материалов и т.д.

16.1.4 Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия Исикавы – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления. Данная диаграмма применяется для выявления причин возникновения проблемы, анализа и структурирования процессов на предприятии, оценки причинно-следственных связей.

Отобразим причинно-следственную диаграмму на рисунке 16.2.

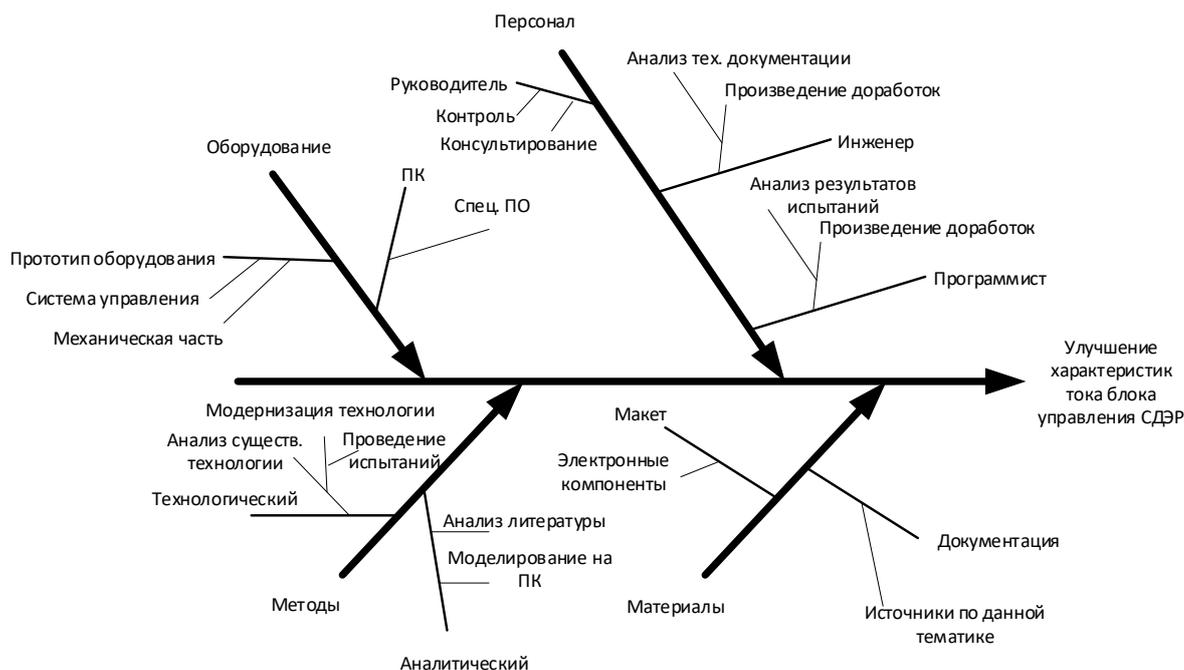


Рисунок 16.2 – Причинно-следственная диаграмма

16.1.5 SWOT-анализ

SWOT - анализ является инструментом стратегического менеджмента. Он представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT - анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап описывает сильные и слабые стороны проекта, находит возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Отообразим матрицу SWOT в таблице 16.7.

Таблица 16.7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны НИР:	Слабые стороны НИР:
	<p>С1. Высокая степень электро- и взрывобезопасности.</p> <p>С2. Заявленная высокая надежность конструкции, удобство и простота в эксплуатации.</p>	<p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки.</p> <p>Сл2. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения.</p>

	<p>С3. Применение ресурсоэкономичных материалов, энергоэкономичность.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p> <p>С5. Перспективы получения новых разработок.</p>	<p>Сл3. Отсутствие стороннего финансирования.</p> <p>Сл4. Сложность осуществления выхода на рынок.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В3. Гранты и государственные программы поддержки инноваций.</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p> <p>В5. Развитие технологий в данной отрасли.</p>	<p>В1; С2; С5;</p> <p>В2; С1; С2; С3; С4;</p> <p>В3; С1; С3; С4;</p> <p>В4; С1; С5;</p> <p>В5; С1; С3; С4, С5.</p>	<p>В2; Сл2;</p> <p>В5; Сл1; Сл3.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p> <p>У3.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У4. Появление новых конкурентных разработок.</p>	<p>У1; С5;</p> <p>У2; С1; С2;</p> <p>У3; С1; С2; С3;</p> <p>У4; С1; С5.</p>	<p>У1; Сл1; Сл3;</p> <p>У2; Сл3;</p> <p>У3; Сл1; Сл2; Сл3;</p> <p>У4; Сл1; Сл3.</p>

Второй этап выявляет соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие помогает определить степень

необходимости проведения стратегических изменений. В пределах данного этапа построим интерактивную матрицу проекта (таблица 16.8). Каждый фактор помечается либо знаком «+» (сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 16.8 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – возможности»

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности проекта	B1	0	+	0	0	+
	B2	+	+	+	+	-
	B3	+	-	+	+	-
	B4	+	-	-	0	+
	B5	+	0	+	+	+

Результат анализа таблицы:

- B1C2C5;
- B2C1C2C3C4;
- B3C1C3C4;
- B4C1C5;
- B5C1C3C4C5.

Также, представим в таблице 16.9 интерактивную матрицу проекта «Сильные стороны – угрозы».

Таблица 16.9 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – угрозы»

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Угрозы	У1	-	-	-	-	+
	У2	+	+	-	-	-
	У3	+	+	+	-	-
	У4	+	-	-	0	+

Результаты анализа таблицы:

- У1С5;
- У2С1С2;
- У3С1С2С3;
- У4С1С5.

В таблице 16.10, 16.11 отразим слабые стороны, их возможности и угрозы.

Таблица 16.10 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – возможности»

		Слабые стороны проекта			
		C1	C2	C3	C4
Возможности проекта	В1	-	-	-	0
	В2	-	+	-	-
	В3	-	-	-	0
	В4	-	-	0	0
	В5	+	0	+	-

Результаты анализа таблицы:

- В2Сл2;
- В5Сл1Сл3.

Таблица 16.11– Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – угрозы»

		Слабые стороны проекта			
		С1	С2	С3	С4
Угрозы	У1	+	0	+	0
	У2	-	0	+	-
	У3	+	+	+	-
	У4	+	-	+	0

Результаты анализа таблицы:

- У1Сл1Сл3;
- У2Сл3;
- У3Сл1Сл2Сл3;
- У4Сл1Сл3.

В рамках **третьего этапа** должен быть подведен итог SWOT-анализа, в котором будут отражены стратегические планы на реализацию проекта и долгосрочное развитие. Анализируя результаты, можно утверждать, что научно-исследовательская работа обладает сильными сторонами в области конечного получаемого конструктивного и технологического решения, что позволяет использовать возможности получения финансирования по государственным и не только грантам и программам для ликвидации слабых сторон проекта в виде отсутствия доказательной базы, а также помощь со

стороны ТПУ и его структур поможет решить проблемы осуществления выхода на рынок и производства в целом.

16.1.6 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для оценки степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснение уровня ее завершения заполняется специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Отообразим бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации в таблице 16.12.

Таблица 16.12 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	1
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3

10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	47	45

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации определяется по следующей формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (2)$$

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

B_i – балл по i -му показателю.

По сумме баллов по направлению степени проработанности научного проекта равным 47, можно судить о том, что проект имеет перспективность выше среднего. По уровню имеющихся знаний у разработчика проект имеет перспективность также выше среднего, суммарный балл составил 45.

16.1.7 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец, преследует вполне определенную цель, куда он намерен направить

полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств, для продолжения своих научных исследований и разработок, одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

Для коммерциализации объекта исследования и обоснования его целесообразности, были проработаны следующие методы коммерциализации научной разработки.

- 1) Реализация лицензий патента.
- 2) Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

Были выбраны два менее затратных метода коммерциализации, так как эти методы являются менее затратными для предприятия.

16.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации проекта определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Данная информация закрепляется в Уставе проекта, который документирует бизнес потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, который планируется создать.

Устав научного проекта имеет следующую структуру:

1. Цели и результат поиска. Приведём информацию о заинтересованных сторонах объекта (таблица 16.13), иерархии целей проекта и критериях достижения целей (таблица 16.14).

Таблица 16.13 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Заказчики	Получение готового продукта и его разработки в целях дальнейшего пользования
Сотрудники компании	Достижение целевых показателей проекта и перспективу карьерного роста
Инвесторы проекта	Получение запланированной доходности проекта

Таблица 16.14 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка контрольно-проверочной аппаратуры для синхронного двигателя с электромагнитной редукцией
---------------	---

Ожидаемые результаты проекта:	Готовый продукт (собранное и запущенное изделие)
Критерии приемки результата проекта:	Соответствие требованиям технического задания заказчика
Требования к результату проекта:	Требование:
	Поддержка требуемых режимов управления СДЭР
	Напряжение питания устройства регулируется от 27 до 100 В
	Наличие ПО для работы с изделием

2. Организационная структура проекта. Перечислим в таблице 15 рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, функции и трудозатраты в проекте.

Таблица 16.15 – Рабочая группа проекта

№ п/п	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Руководитель	Контроль за реализацией проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координатор деятельности по проекту	193
2	Инженер	Специалист, выполняющий работы по проекту	3714
			3907

Таблица 16.16 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/Допущения
2.1. Бюджет проекта	1200000 рублей
2.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
2.2. Сроки проекта:	750 дней со дня утверждения плана управления проектом
2.2.1 Дата утверждения плана управления проектом	16.04.2018
2.2.2. Дата завершения проекта	05.05.2020
2.3.Прочие ограничения и допущения	Допускается задержка выполнения обязательств по разработке в связи с ограничениями, которые возникли из-за непредвиденных ситуаций (стихийные бедствия, пандемия, изменения в законодательстве)

16.3 Планирование управления научно-техническим проектом

16.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Представим иерархическую структуру работ проекта на рисунке 16.3.

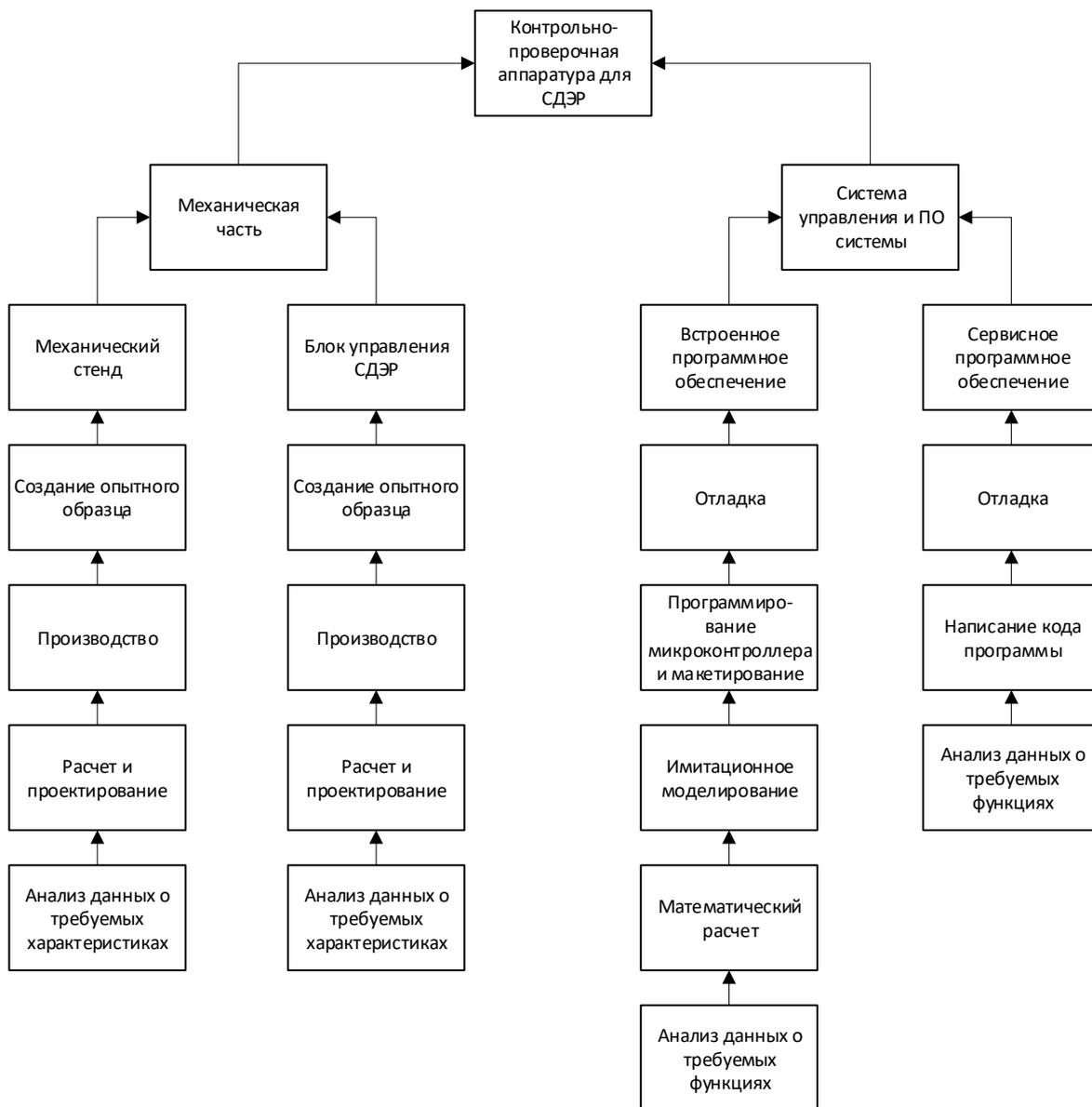


Рисунок 16.3 – Иерархическая структура работ проекта

16.3.2 Контрольные события проекта

Определим ключевые события проекта, их даты и результаты в таблице

16.17.

Таблица 16.17 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Разработка модели системы управления СДЭР	15.03.2019	Документ в формате Word
2	Разработка конструкторской документации для механического стенда	01.08.2019	Техническая документация
3	Разработка конструкторской документации для блока управления СДЭР	01.09.2019	Техническая документация
4	Разработка кода встроенного программного обеспечения	01.11.2019	Проект МехBIOS
5	Разработка кода сервисного программного обеспечения	31.12.2019	Проект Qt
6	Производство опытных образцов механической части	01.03.2020	Опытный образец механического стенда и опытный образец блока управления СДЭР
7	Отладка программного обеспечения	15.04.2020	Техническая документация

16.3.3 План проекта

Для выполнения целесообразного и рационального планирования, необходимо разработать календарный план, который включает в себя основные этапы разработки и создания проекта (таблица 16.18).

Таблица 16.18 – Календарный план проекта

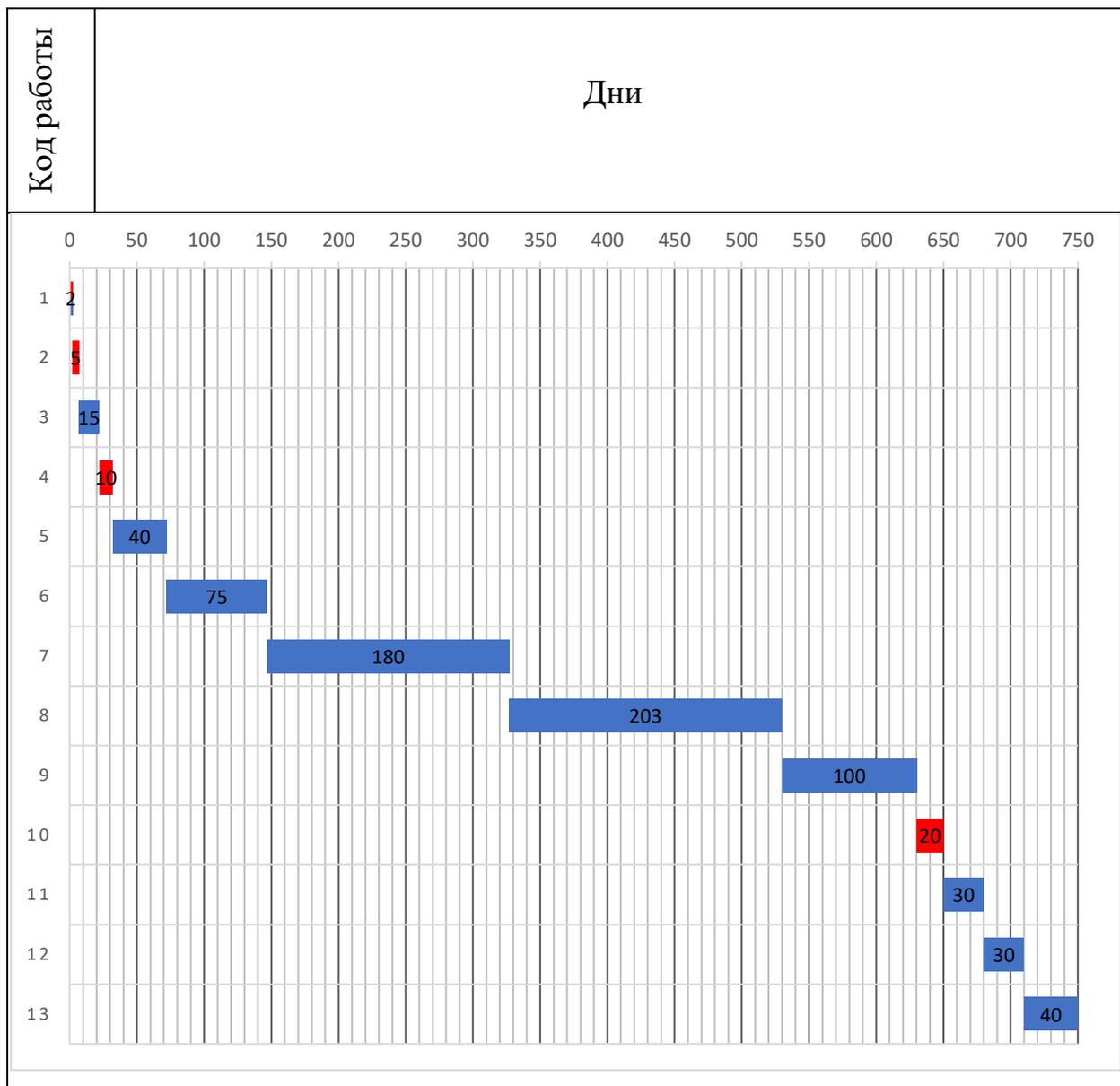
Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Выбор направления исследования	2	16.04.2018	18.04.2018	Руководитель Инженер

2	Составление технического задания	5	18.04.2018	23.04.2018	Руководитель
3	Изучение литературы	15	23.04.2018	08.05.2018	Инженер
4	Календарное планирование работ по проекту	10	08.05.2018	18.05.2018	Руководитель
5	Разработка модели системы управления СДЭР	40	18.05.2018	27.06.2018	Инженер
6	Разработка конструкторской документации для механического стенда	75	27.06.2018	10.09.2018	Инженер
7	Разработка конструкторской документации для блока управления СДЭР	180	10.09.2018	09.03.2019	Инженер
8	Разработка кода встроенного программного обеспечения	203	09.03.2019	28.09.2019	Инженер
9	Разработка кода сервисного программного обеспечения	100	28.09.2019	06.01.2020	Инженер
10	Оценка эффективности полученных результатов	20	06.01.2020	26.01.2020	Руководитель
11	Технико-экономические расчеты	30	26.01.2020	25.02.2020	Инженер

12	Вопросы безопасности и экологичности проекта	30	25.02.2020	26.03.2020	Инженер
13	Составление пояснительной записки	40	26.03.2020	05.05.2020	Инженер

Для предоставления календарного плана более наглядным образом, используем диаграмму Ганта, которая применяется для иллюстрации графика или плана работ проектов (таблица 16.19).

Таблица 16.19 – Диаграмма Ганта



■ - инженер, ■ - руководитель

Также, на диаграмме Ганта можно выделить совокупные задачи, отметить проценты завершения, отметить метки ключевых моментов (вехи).

16.3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Бюджет научно-технического исследования складывается из следующих статей расходов:

- материальные расходы;

- амортизация;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

16.3.4.1 Материальные расходы

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, информационные носители, картриджи и т.п. Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (3)$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Значения цен на материальные ресурсы установлены по данным, размещенным на сайте канцелярского магазина ООО «Папирус», ТД «Канцелярский мир».

Привлечение сторонней организации «NetCafe» для типографических работ.

Стоимость используемых материалов приведена в таблице 16.20.

Таблица 16.20 – Материальные затраты на выполнение научного исследования

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Бумага для принтера	упаковка	3	300	900
Ручка	штук	10	12	120
Брошюровка	штук	10	25	250
USB накопитель	штук	1	1450	1450
Линейка	штук	1	300	300
Распечатка файлов	лист	1500	2	3000
Мультифора	штук	30	2	60
Итого:				6080

Таким образом материальные затраты на выполнение данного научно-технического исследования составляют 216080 рублей.

16.3.4.2 Амортизация

Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования. Для проектирования требуется следующее оборудование:

Компьютер - 45000 рублей.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор} \quad (4)$$

где $T_{\text{исп.}}$ - время использования оборудования = 718 дней;

$T_{\text{Г}}$ - количество использования в год = 365 дней;

$C_{\text{обор.}}$ - стоимость оборудования = 45000;

$T_{\text{сл.}}$ - срок службы оборудования = 3 лет

Пример расчета:

$$I_{\text{ам}} = \frac{718}{365} \cdot \frac{1}{3} \cdot 45000 = 29506,85$$

16.3.4.3 Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 99957,35 + 14993,6 = 114950,95 \text{ руб} \quad (5)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$)

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 2701,55 \cdot 37 = 99957,35 \text{ руб} \quad (6)$$

где $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{237} = \frac{57166,72 \cdot 11,2}{237} = 2701,55 \text{ руб}, \quad (7)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб

M – количество месяцев работы без отпуска в течении года:

— при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

— при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 16.21).

Таблица 16.21 – Годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- Выходные дни	52	52
- Праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- Отпуск	48	48
- Больничный	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад сотрудника (руководитель):

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,3) \cdot 1,3 = 57166,72 \text{ руб} \quad (8)$$

где Z_{mc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (30% от Z_{mc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в научном исследовательском институте за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{mc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.

В примерах приведены расчет заработной платы руководителя.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице №16.22.

Таблица 16.22 – Расчёт заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	27484	0,3	0,3	1,3	57166,72	2701,55	37	14993,6	99957,35
Инженер	17808	0,3	0,3	1,3	45588,48	2154,39	715	184846,66	1540388,85
Итого									1640346,20

16.3.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата – это оплата за непроработанное время. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается с помощью коэффициента $k_{доп}$ по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (9)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15),

Расчет:

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 99957,35 = 14993,6 \text{ руб (для руководителя),}$$

$$Z_{доп} = 0,12 \cdot 1540388,85 = 184846,66 \text{ руб (для инженера)}$$

16.3.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Данная статья расходов включает в себя обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам во внебюджетные фонды. К внебюджетным фондам относятся: фонд социального страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ), федеральный фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (10)$$

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

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (99957,35 + 14993,6) = 34485,29 \text{ руб (руковод.)}$$

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (1540388,89 + 184846,66) = 517570,67 \text{ руб (инж.)}$$

На 2020 г. размер страховых взносов равен 30%.

16.3.4.6 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты, которые не попали в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot k_{нр} \quad (11)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (16%).

Расчет:

$$Z_{\text{накл}} = (1640346,20 + 199840,26 + 552055,96) \cdot 0,16 = 382758,79 \text{ руб.}$$

16.3.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 16.23.

Таблица 16.23 – Бюджет затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
Материальные расходы	6080	0,2%
Амортизация	29506,85	1,0%
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	1640346,20	58,4%
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	199840,26	7,7%
Отчисления во внебюджетные фонды	552055,96	19,6%
Накладные расходы	382758,79	13,6%
Бюджет затрат НИИ	2810588,06	100%

16.3.5 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта сформируем матрицу ответственности (таблица 16.24).

Таблица 16.24– Матрица ответственности

Этапы проекта	Инженер	Руководитель
Выбор направления исследования	*	*
Составление технического задания		*
Изучение литературы	*	
Календарное планирование работ по проекту		*
Разработка модели системы управления СДЭР	*	
Разработка конструкторской документации для механического стенда	*	
Разработка конструкторской документации для блока управления СДЭР	*	
Разработка кода встроенного программного обеспечения	*	
Разработка кода сервисного программного обеспечения	*	
Оценка эффективности полученных результатов		*
Технико-экономические расчеты	*	
Вопросы безопасности и экологичности проекта	*	
Составление пояснительной записки	*	

16.4 Определение ресурсоэффективности проекта

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (12)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Максимальные затраты на покупку комплектующих для создания прототипа оборудования были приняты равными 210000 рублей.

На основании таблицы 16.6, стоимость комплектующих варианта исполнения текущей разработки равна 202056,9 рублей. Итоговая стоимость данного варианта исполнения составляет 3012644,96 рубля, включая бюджет затрат НИИ (таблица 16.24).

Аналог разрабатываемого оборудования применяется в основном в системах испытаний электродвигателей. Он отличается от разрабатываемого проекта дороговизной, неудобством управления и сравнительно низкой точностью.

Произведем замену нагружающей муфты на механическом стенде, его цена равна 66330 рублей. Стоимость варианта исполнения аналога с источником момента составляет 84106 рублей. Итоговая стоимость данного

варианта исполнения составляет 3253745,63 рубля, включая бюджет затрат НТИ (таблица 16.24).

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{3012644,96}{3300000} = 0,913$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{3253745,63}{3300000} = 0,986$$

Следовательно, исходя из этого, можно сделать вывод, что интегральный показатель разработки текущего проекта показывает удешевление стоимости разработки в 0,913 раз (8,7 %), а интегральный показатель разработки аналога на шаговых двигателях показывает удешевление стоимости разработки в 0,986 раз (1,4%), т.е. удорожание на 7,3% относительно стоимости разрабатываемого контрольно-проверочного оборудования с использованием тормозной муфты.

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (13)$$

где I_{pi} - интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i - весовой коэффициент разработки;

b_i - банальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Для определения ресурсоэффективности проекта рекомендуется рассмотреть следующие критерии:

Надежность – это длительный эксплуатационный ресурс (в частности, в условиях атмосферы с содержанием агрессивных реагентов, не стабильным напряжением и высокой влажностью).

Энергосбережение – это экономия электрической энергии. Энергосбережение достигается за счет оптимального подбора компонентов.

Точность получаемых характеристик – это показатель, который отражает правильность и качество подобранных компонентов.

Удобство – это возможность лёгкой настройки, монтажа и демонтажа оборудования. Удобство монтажа и демонтажа осуществляется в отсутствие большого количества резьбовых соединений, в данной конструкции используются мультиконтактные силовые разъёмы.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 16.25.

Таблица 16.25 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	КПА с тормозной муфтой	КПА с тормозной нитью	КПА с электромагнитным тормозом
Безопасность	0,25	5	5	5
Удобство в эксплуатации	0,10	5	5	5
Энергосбережение	0,15	4	4	5
Надежность	0,25	5	4	4
Точность	0,25	5	4	3
Итого:	1.00	4,85	4,35	4,25

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{mn} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 = 4,85$$

$$I_{аналог1} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 = 4,35$$

$$I_{\text{аналог}2} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 = 4,25$$

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}, I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} \quad (14)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,85}{0,913} = 5,312$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} = \frac{4,35}{0,986} = 4,412$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (15)$$

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

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

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{5,312}{4,412} = 1,204$$

Отразим сравнительную эффективность разработки в таблице 16.26.

Таблица 16.26 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,986	0,913

2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,35	4,85
3	Интегральный показатель эффективности	4,412	5,312
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,204	

Интегральный показатель эффективности проекта имеет достаточно высокое значение по отношению к аналогу, что говорит об эффективности использования технического решения данного проекта.

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность этого технического решения в сравнении с другим конкурентоспособным контрольно-проверочным оборудованием. Так же была произведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований в данной области с позиции ресурсоэффективности, произведен FAST анализ, SWOT-анализ, осуществлено планирование работ, находящихся в рамках данного научного исследования, определены временные рамки и трудоемкость работ каждого из участников исследования, составлен ленточный график проведения работ в форме диаграммы Ганта, по результатам которой определено, что выполнение работы занимает 750 дней, из которых 37 рабочих дня у руководителя и 715 дней у инженера.

Произведен расчет бюджета НТИ равный 3012644,96 руб, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников, отчисления внебюджетные фонды.

В результате эксплуатации выбранного контрольно-проверочного оборудования с тормозной муфтой повышается эффективность работы за счет уменьшения общего расхода на оборудование, повышения надежности и ресурсоэффективности.

17. Социальная ответственность

Целью данного раздела является обеспечение безопасности, соблюдение экологических норм в здании, в котором расположено оборудование, необходимое для разработки и исследования испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией. Будет рассматриваться обеспечение необходимых условий труда в лаборатории 230 8-го корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ. Площадь рабочего помещения составляет 66 м^2 (длина $A = 12 \text{ м}$, ширина $B = 5,5 \text{ м}$), объем составляет 264 м^3 (высота $C = 4 \text{ м}$). Помещение рассчитано на 8 человек, на каждое одно рабочее место приходится в среднем $8,25 \text{ м}^2$ общей площади и 33 м^3 объема. По санитарным нормативам на одного человека приходятся 6 м^2 площади и 24 м^3 объема. В помещении расположено четыре многофункциональных рабочих стенда для проведения лабораторных испытаний, четыре персональных компьютера для выполнения различных работ и отчетов. В данной лаборатории вентиляция осуществляется как за счет проветривания - смена воздуха в помещении осуществляется через неплотности в проемах дверей, так и за счет организованной канальной естественной вытяжной вентиляции. Естественное освещение обеспечивается четырьмя оконными проемами.

Так же разделе будут рассмотрены санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности, вопросы экологической безопасности, в соответствии с действующими нормативными документами.

17.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Правовые нормы трудового законодательства изложены в документе: «Трудовой кодекс Российской Федерации». Согласно данному документу, виды специальных норм трудового права представляют собой следующее:

- Нормы-льготы, предоставляют дополнительные гарантии трудовых прав;
- Нормы-приспособления, подстраивают общие нормы к данным условиям труда;
- Нормы-изъятия, ограничивают общие права.

Особенности трудового законодательства, применимы к условиям выполнения исследовательской деятельности, изложенного в данной работе, дифференцируются в соответствии с условиями труда: тяжесть и вредность труда, климатические условия, прочие особенности труда.

Согласно «ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования», место для работы за ПК и взаиморасположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. При обустройстве рабочего места инженера, необходимо соблюсти основные условия: выбрать наилучшее местоположение оборудования и обеспечить свободное рабочее пространство. Компонировка рабочего места представлена на рисунке 17.1.

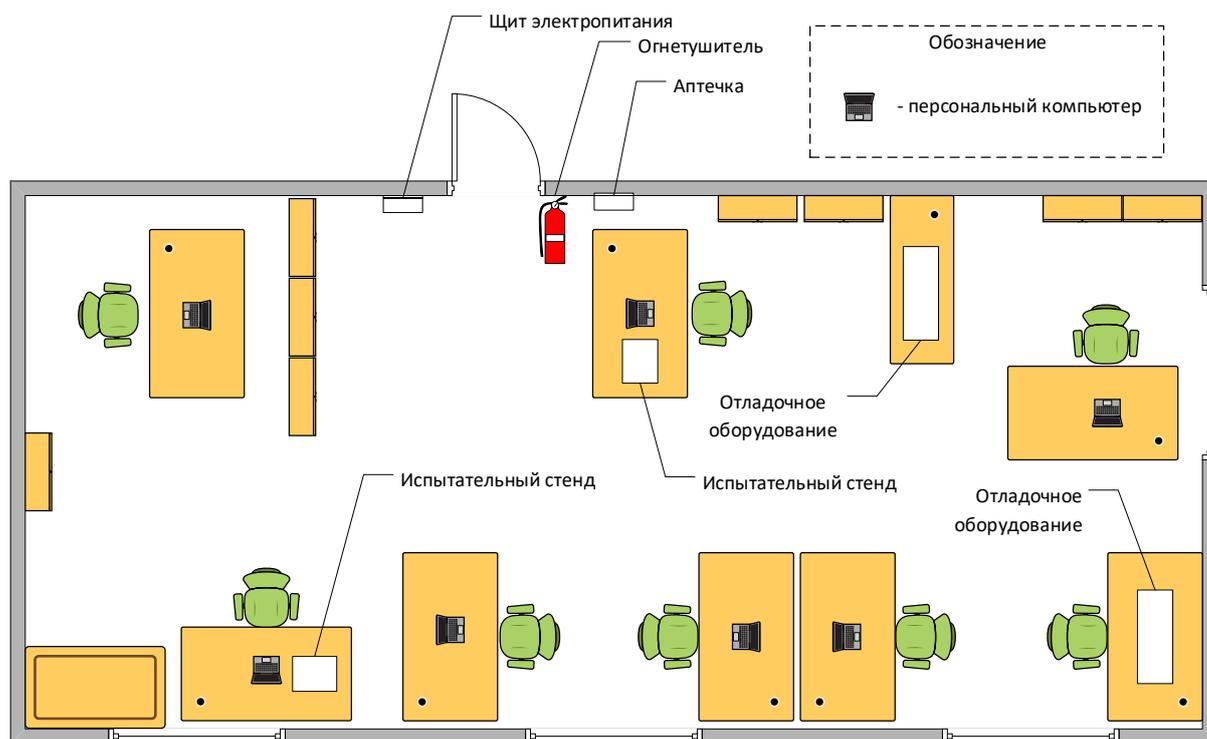


Рисунок 17.1 – Структурна схема компоновки лабораторного комплекса

Эргономическими аспектами проектирования рабочих мест, в частности, являются: высота рабочей поверхности, размеры пространства для ног, требования к расположению документов на рабочем месте, характеристики рабочего кресла, требования к поверхности рабочего стола, регулируемость элементов рабочего места.

Сидячее положение вызывает минимальное утомление рабочего. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства (рисунок 17.2).

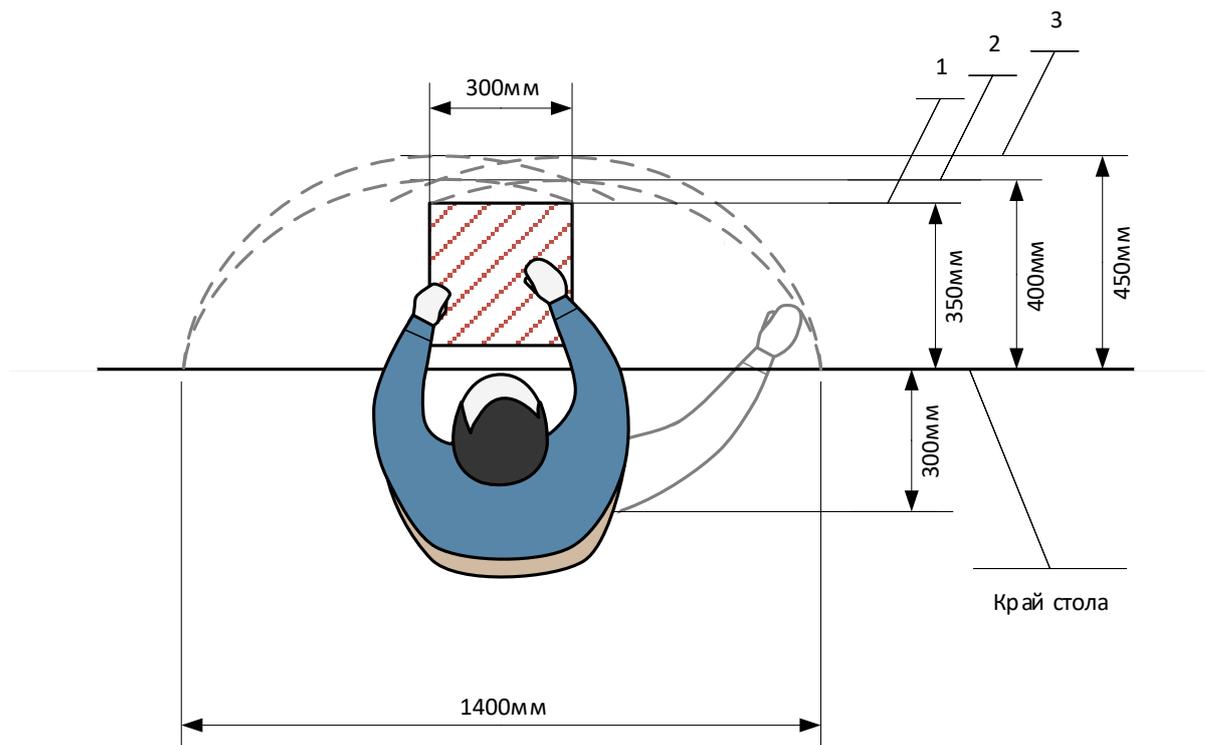


Рисунок 17.2 –Зоны досягаемости рук: 1 – оптимальная, 2 – нормальная, 3 – максимальная.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости, рисунок 17.3:

- 1) персональный компьютер размещается в центре;
- 2) «мышь» – в оптимальной зоне справа;
- 3) документация в зоне справа;
- 4) испытательный стенд в зоне слева;
- 5) рабочая зона.

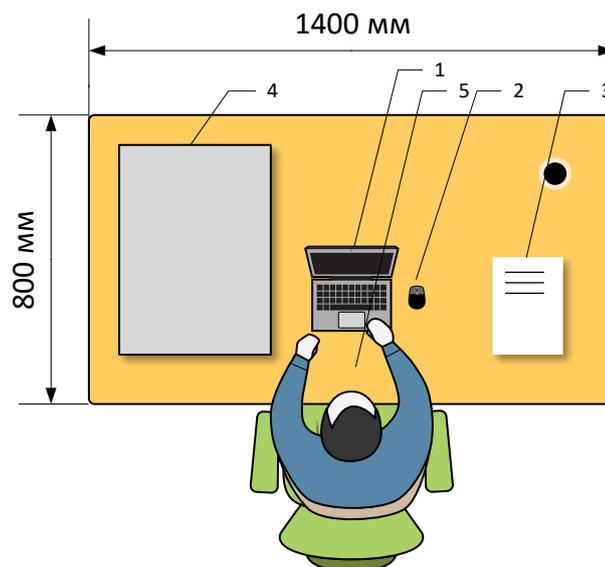


Рисунок 17.3 – Размещение основных и периферийных составляющих рабочего места

Для комфортной работы стол должен удовлетворять следующим условиям:

- Высота стола должна быть выбрана с учетом возможности сидеть свободно, в удобной позе, при необходимости опираясь на подлокотники;
- Нижняя часть стола должна быть сконструирована так, чтобы человек мог удобно сидеть, не был вынужден поджимать ноги;
- Поверхность стола должна обладать свойствами, исключающими появление бликов в поле зрения работника;
- Высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680 – 760мм.

Большое значение придается характеристикам рабочего кресла. Так, рекомендуемая высота сиденья над уровнем пола находится в пределах 420-550мм. Поверхность сиденья мягкая, передний край закругленный, а угол наклона спинки – регулируемый.

Положение экрана определяется:

- расстоянием считывания (0,6...0,7м);

- углом считывания, направлением взгляда на 20 градусов ниже горизонтали к центру экрана, причем экран перпендикулярен этому направлению.

Должна также предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от -10° до +20° относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Большое значение также придается правильной рабочей позе пользователя. При неудобной рабочей позе могут появиться боли в мышцах, суставах и сухожилиях.

Требования к рабочей позе пользователя следующие:

- голова не должна быть наклонена более чем на 20 градусов;
- плечи должны быть расслаблены;
- локти - под углом 80° ...100°.

Во время пользования компьютером медики советуют устанавливать монитор на расстоянии 50-60 см от глаз. Специалисты также считают, что верхняя часть видеодисплея должна быть на уровне глаз или чуть ниже. Когда человек смотрит прямо перед собой, его глаза открываются шире, чем, когда он смотрит вниз. За счет этого площадь обзора значительно увеличивается, вызывая обезвоживание глаз. К тому же если экран установлен высоко, а глаза широко открыты, нарушается функция моргания. Это значит, что глаза не закрываются полностью, не омываются слезной жидкостью, не получают достаточного увлажнения, что приводит к их быстрой утомляемости. Пример правильного расположения работника за ПК представлен на рисунке 17.4.

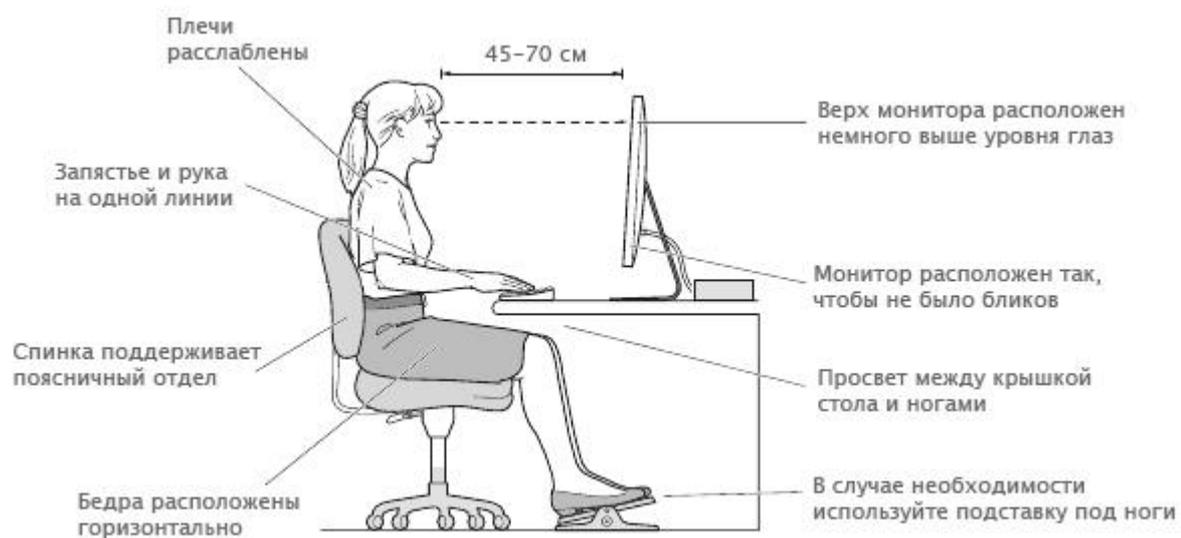


Рисунок 17.4 – Пример правильного расположения работника за персональным компьютером

17.2 Описание технологического процесса и рабочего места

Технологический процесс исследования и разработки испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией заключается в следующем:

- ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике;
- компьютерное моделирование системы;
- анализ полученных результатов моделирования;
- проверка разрабатываемой системы в условиях, приближенных к реальным;
- анализ полученных результатов проверки.

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- ноутбук;
- исследуемый синхронный двигатель с электромагнитной редукцией;
- отладочный комплект.

17.3 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований и разработке в лаборатории испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукицией. В таблице 17.1 представлены возможные вредные и опасные факторы, согласно нормативным документам.

Таблица 17.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Исследование	Разработка	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ 12.1 005-88; СанПиН 2.4.2.2821-10
2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение; СНиП 23-05-95
3. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание, которой может произойти через тело человека		+	+	ГОСТ 12.1.038–88 ССБТ Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов.
4. Опасность получения механических травм от движущихся частей		+	+	ПОТ Р О-14000-002-98 Положение. Обеспечение безопасности производственного оборудования
5. Опасность возгорания	+	+	+	ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования

17.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению их воздействия на исследователя

17.4.1 Опасные производственные факторы

Опасными производственными факторами при исследовании и разработке испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией являются:

- поражение электрическим током;
- опасность получения механических травм от движущихся элементов электропривода;
- опасность возгорания.

17.4.1.1 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от поражения электрическим током необходимо, согласно правилам устройства электроустановок, рассмотреть следующие вопросы:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемая лаборатория не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током.

Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты:

- изоляция проводов и её непрерывный контроль;
- предупредительная сигнализация и блокировка;
- использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
- защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В, используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

Основными последствиями механических опасностей являются:

- защемление или раздавливание;
- порезы;
- отрезание или разрубание;
- захват или наматывание;
- затягивание или задерживание;
- попадание под удар;
- местный укол или полное прокалывание;
- поверхностное повреждение наружных тканей под действием трения;

17.4.1.2 Опасность получения механических травм от движущихся элементов электропривода

К средствам защиты работающих от механического травмирования (физического опасного фактора) относятся:

- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);
- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами;

- сигнальные цвета и сигнальная разметка, знаки производственной безопасности.

17.4.1.3 Опасность возгорания

Пожары – неконтролируемый процесс горения, которые чреваты большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемая лаборатория относится к классу В (обработка или применение твердых сгораемых веществ и материалов, а также жидкостей с температурой выше 120 градусов): электроизоляция, бумага, мебель. Т.е. технологический процесс в лаборатории исключает взрывоопасную зону, имеющиеся вещества могут только гореть. Лаборатория имеет пожароопасную зону класса П-2а. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Лаборатория оснащена такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно на 800 м² защищаемой площади рекомендуется

использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей. Для лаборатории достаточно одного двухкилограммового огнетушителя ОУ.

17.4.2 Вредные производственные факторы

Вредными производственными факторами при исследовании и разработке испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией являются:

- отклонение показателей микроклимата;
- недостаточная освещенность рабочей зоны.

17.4.2.1 Микроклимат

Микроклимат – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда.

Для создания и поддержания в лаборатории, независимо от наружных условий, оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды. Оптимальные и допустимые нормы микроклимата представлены в таблице 17.2.

Таблица 17.2 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Период, Год	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный и переходный	легкая	20-23	60-40	0,2
Теплый	легкая	22-25	60-40	0,2

Научно-исследовательская лаборатория управления электроприводами 230 восьмого корпуса ТПУ является помещением I б категории (таблица 17.3), согласно СанПиН 2.4.2.2821-10. Допустимые величины интенсивности

теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) представлены в таблице 17.4.

Для оценки воздействия параметров микроклимата в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания используется ТНС-индекс, нормативные величины которого приведены в таблице 17.3.

Таблица 17.3 – Допустимые величины ТНС-индекса

Категория работ по уровню энергозатрат, Вт.	Величины интегрального показателя, °С
Ia(до 139)	22,2-26,4
Iб(140-174)	21,5-25,8
IIa(175-232)	20,5-25,1
IIб(233-290)	19,5-23,9
III(более 290)	18,0-21,8

Таблица 17.4 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
Не более 25	100

В лаборатории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы.

17.4.2.2 Освещение

Неудовлетворительное освещение может исказить информацию, кроме того, оно вызывает утомление всего организма в целом. Освещение должно обеспечивать выполнение работы без напряжения зрения. Применяют два

вида освещения: естественное и искусственное. Для искусственного освещения применяют электрические люминесцентные лампы. Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Нормируемый показатель искусственного и естественного освещения по п.191 составляет 150 лк.

При выборе системы освещения для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования.

Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается.

Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. По спектральному составу видимого света различают лампы 42 дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ).

Наиболее широко применяются лампы типа ЛБ. При повышенных требованиях к передаче цветов освещением применяются лампы типа ЛХБ, ЛД. Лампа типа ЛТБ применяется для правильной цветопередачи человеческого лица. Характеристики люминесцентных ламп приведены в таблице 17.5

Таблица 17.5 – Основные характеристики люминесцентных ламп

Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Световой поток			
		ЛД	ЛХБ	ЛБ	ЛТБ
15	127	700	820	835	850
20	127	880	1020	1060	1060
30	220	1650	1940	2020	2020
40	220	2300	2700	2800	2850
65	220	3750	4400	4600	4600
80	220	4250	5000	5200	5200
125	220	-	8000	-	8150

Основные требования и значения нормируемой освещённости рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95. Выбор освещённости осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона.

17.5 Экологическая безопасность

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях. При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014): бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация

возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцево-кислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцево-кислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртути материала (винипласта).

К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия.

– во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию).

– во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

17.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации при разработке и исследовании испытательного оборудования для синхронных двигателей с электромагнитной редукцией: возникновение пожара (загорания) и поражение электрическим током.

Обеспечение требований пожаробезопасности в лаборатории описано в п. 17.4.1.3.

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

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

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Лаборатория 230 восьмого корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителем ОУ-3, 1шт. (предназначен для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

В корпусе № 8 ФГАОУ ВО НИ ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить

электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию в соответствии с планом эвакуации.

На рисунке 17.5 представлен план эвакуации из лаборатории 230 8 корпуса ТПУ.

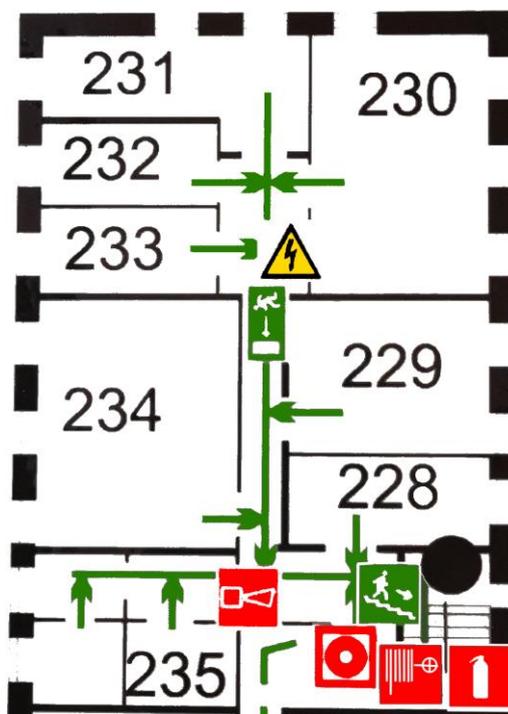


Рисунок 17.5 – План эвакуации из лаборатории 230 8 корпуса ТПУ

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на исследователя, в момент выполнения его работы, согласно действующей нормативно – технической документации. Рассмотрены правовые и организационные моменты по обеспечению безопасности труда. Так же предложены основные меры по профилактике и ликвидации воздействий пагубных факторов на организм человека, таких как шум, вибрация, микроклимат, освещение и т.д. В данном разделе были проанализированы такие вопросы как экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях. Для этого рассмотрены возможные случаи их возникновения и проработаны методы по их предотвращению.

Отталкиваясь от всего вышесказанного, можно прийти к выводу, что, с точки зрения эффективности трудовой деятельности работника, правильная организация рабочего места играет колоссальную роль. Правильные условия труда способствуют повышению эффективности и производительности работ научного сотрудника. При соблюдении всех выше перечисленных мер безопасности, научный сотрудник будет полностью защищен от влияния опасных и вредных факторов, чрезвычайных ситуаций, несчастных случаев. Так же будут соблюдаться экологические нормы безопасности.

Данный раздел имеет большую значимость в практическом применении, так как предоставленный материал соответствует нормативным документам, которые регламентируют влияние на человека, каждого выявленного опасного или вредного фактора.

Заключение

Рассмотрены принципы работы и управления шагового двигателя, на основе которых была разработана имитационная модель системы управления для двух- и трех- фазных СДЭР в шаговом режиме и проверена работоспособность предложенных алгоритмов формирования фазных токов инвертором напряжения.

Проведено макетирование устройства БУ КПА ЭД с использованием низковольтного отладочного комплекта под управлением микропроцессора производства НИИЭТ К1921ВТ01К, с последующим запуском двух- и трехфазных двигателей. Управление фазными токами осуществлялось согласно разработанным алгоритмам. В качестве результата работы приведены осциллограммы токов фаз двигателя совместно с заданием формируемым инвертором.

Проверено управление в режиме реального времени, получение графиков, управление различными типами двигателей. В качестве результата работы приведены осциллограммы токов фаз двигателя совместно с заданием формируемым инвертором.

Проведен технический анализ выбора компонентов для изготовления БУ КПА ЭД. Заключением по проделанной работе следует вывод о работоспособности разработанных алгоритмов формирования токов фаз СДЭР и принципиальной возможности создания опытного образца БУ КПА ЭД.

Выполнялась проверка на макете блока КПА ЭД, выполненного на отечественной элементной базе.

Проведены испытания на получение выходной характеристики двухфазного синхронного двигателя с электромагнитной редукцией, где в качестве испытательного оборудования выступала разработанная система.

Испытания проходили с использованием разработанных алгоритмов и механизмов. При проведении испытаний было отмечено соответствие форм полученных кривых характеристик и было выдвинуто предположение касательно имеющих отличий.

По результатам работы можно сделать вывод, что разработанная система контрольно-проверочного оборудования имеет все необходимые системы, узлы и алгоритмы для штатной работы в качестве испытательного оборудования.

В экономической части выпускной квалификационной работы исследованы вопросы планирования, определение ресурсной (ресурсосберегающей), бюджетной, финансовой, социальной и экономической эффективности научно-технического исследования, расчет материальный затрат, расчет показателя конкурентно способности, расчет бюджета для научно-технического исследования.

В разделе безопасности и экологичности проекта, рассмотрены вопросы: промышленной безопасности, техники безопасности, анализ опасных и вредных производственных факторов, пожарная и электробезопасности, рассмотрены мероприятия по охране окружающей среды.

Список используемой литературы

1. Шаговые двигатели: учеб. пособие/ А. В. Емельянов, А. Н. Шилин/ ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 48 с.
2. The Handbook of Small Electric Motors, Yeadon and Yeadon, Eds, McGraw Hill, 2001
3. P.P.Acarnley, stepping motors: A Guide to Modern Theory and Practise. Stevenge, UK: P.Peregrinus, Ltd., 1982.
4. M.Bodson and J.Chiasson, “Application of nonlinear control methods to the positioning of a permanent magnet stepper motor,” in Proc.28th IEEE Conf.DecisionContr.,Tampa,FL 1989.
5. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Москва "Энергоатомиздат". 1987.
6. В.Б. Самородов, Н.А. Митцель. Исследование свойств шагового электропривода как системы управления двухпоточной гидрообъемномеханической трансмиссией. Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. г.Харьков, 2014 г.
7. Paul A. Stepping Motors: a guide to theory and practice 4th edition. IET control engineering series 63. 2002.
8. Колодийчик В.П. Шаговые двигатели. Принцип действия. Различные способы управления. // Электротехнический рынок №12, декабрь 2007 г.
9. Dr. Douglas W. Jones, Reston Condit. Stepping motor fundamentals. University of Iowa. Microchip Technology Inc. AN907. 2004.

10. Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems / А.А. Емельянов, В.В. Бесклеткин [и др.] – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. - № 15 (119). – С. 5-10. – URL: <https://moluch.ru/archive/119/33079/> (дата обращения: 04.05.2020).

11. Соколов А.В. Динамические модели шаговых электродвигателей. // ЮжноУральский государственный университет. Серия «Энергетика», выпуск 17, г. Челябинск 2012 г.

Приложение I

(справочное)

Stepper Motor

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Марков Михаил Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Каракулов Александр Сергеевич	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Качалов Николай Александрович	к.п.н.		

A stepper motor is an electromechanical system which is transducing an electrical signal into a mechanical one. It is designed to accomplish a discrete movement (the notion of step) and reach a precise position. With a computer-controlled stepping you can attain very precise positioning and speed regulator.

Applications of Stepper Motor:

For this motivation, stepper motors are the motor of choice for many precision motion control applications. stepper motors are operated in inclusive collection of exact motion and measurement appliances such as nuclear power plant, aeronautics, robotic, automotive, medical, manufacturing industry etc. the best example is the pick and place automatons used in surface mount technology line. Besides, it is also applied remotely in hazardous and extreme environments such as volcanic region, atomic or chemical plant, narrow spaces such as in a collapsed building or underground, mountain region and robotic application such as a flying robot.

SMs are used generally for several uses in industrialized fields as CNC machines, printers, and flexile welding arm. Robotics is one of the areas where the use of SM is of greatest significance

- The stepper motor also use in X-Y plotter.

Features of Stepper Motor

- SMs have no brushes.
- Its performance does not depend on the load.
- It can be controlled in the open-loop method effectively (The rotation angle of the motor is proportional to the digital input pulse).
- SMs are able to hold the shaft stationary.
- Excellent response to starting/stopping/reversing.
- SMs relatively inexpensive and simple in construction and can be made to step in equal increments in either direction.
- Low maintenance
- Low cost for control achieved
- A wide range of rotational speeds can be realized as the speed is proportional to the frequency of the input pulses.

Torque/ Speed characteristics:

One weakness with the SM is the limit torque abilities at high speeds, since the torque of an SM will falls with rising speed above the cutoff speed (i.e. in resonant speed), as shown in the figure below. When the motor is operating below its cutoff speed, the rise and fall times of the current through the motor windings

occupy an insignificant fraction of each step, while at the cutoff speed, the step duration is comparable to the sum of the rise and fall times [1].

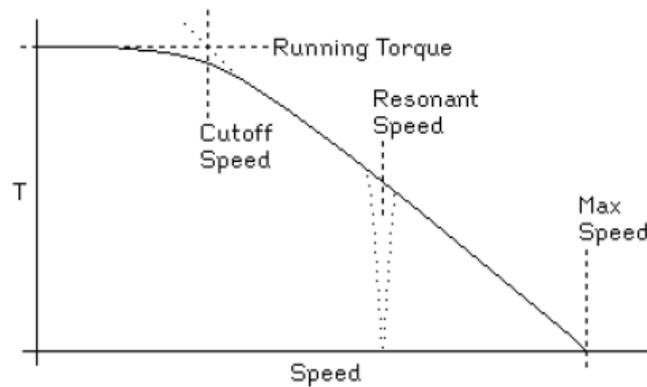


Fig.1 - Torque vs. Speed Curve

Step Angle of the SM:

The angle through which the motor shaft revolves for each command signal is named the step angle (β) as shown in figure below. Reduced the step angle, increased the number of steps per revolution and higher the resolution or accuracy of positioning obtained. The step angles can be as slight as 0.72° or as large as 90° . But the most traditional step sizes are 1.8° , 2.5° , 7.5° and 15° .

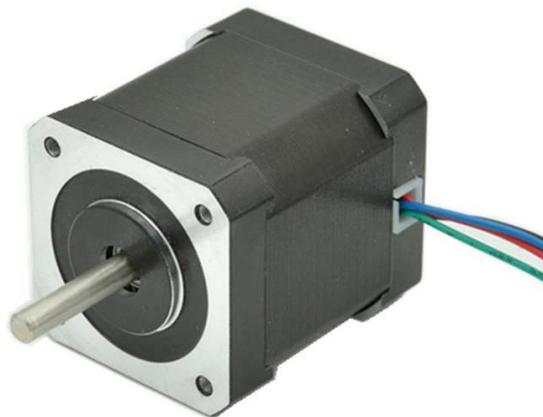


Fig.2 - Stepper Motor (1.8 Degree)

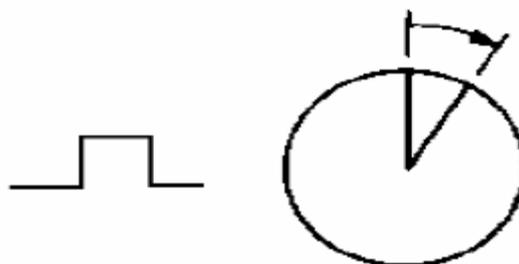


Fig. 3 - One Pulse Equals One Step

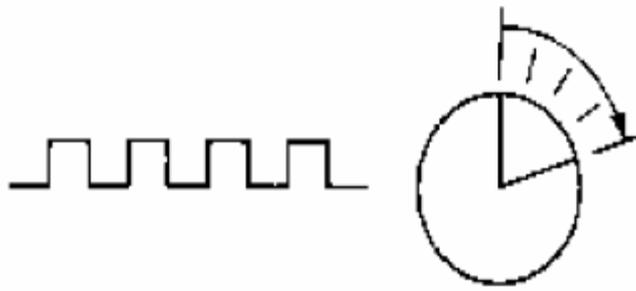


Fig. 4 - Pulse Count Equals Step Count

The value of step angle can be expressed either in terms of the rotor and stator poles (teeth) N_r and N_s respectively as equation (1) or in terms of the number of stator phases (m) and the number of rotor teeth as equation (2) [2].

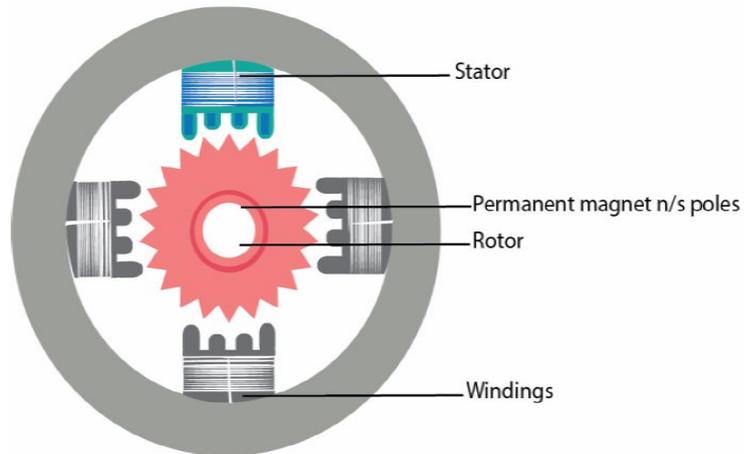


Fig. 5



Fig. 6

$$\beta = \frac{N_s - N_r}{N_s \cdot N_r} \cdot 360^\circ \quad (1)$$

or

$$\beta = \frac{360^\circ}{m \cdot N_r} \quad (2)$$

If $m \cdot N_r$, for example, is equal to 200 then from the above equation, the step angle is 1.8° .

Resolution is given by the number of steps needed to complete one revolution of the rotor shaft as equation (3). Higher the resolution, greater the accuracy of positioning of objects by the motor.

$$\text{Resolution} = \frac{\text{No. of steps}}{\text{revolution}} = \frac{360}{\beta} \quad (3)$$

Types of SMs According to Arrangement of Stator Windings:

The stator part of the SM holds numerous windings. The arrangement of these windings is the major factor that differentiates various kinds of SMs from an electrical point of opinion. Thus SMs may be wound using either unipolar windings or bipolar windings and as follows [3].

a) Unipolar Motors:

Unipolar SMs are collected from two windings; everyone has a center tap. The center taps are either carried outside the motor as two individual wires or coupled to each other inside and carried out the motor as single wire as presented in Fig. 7.

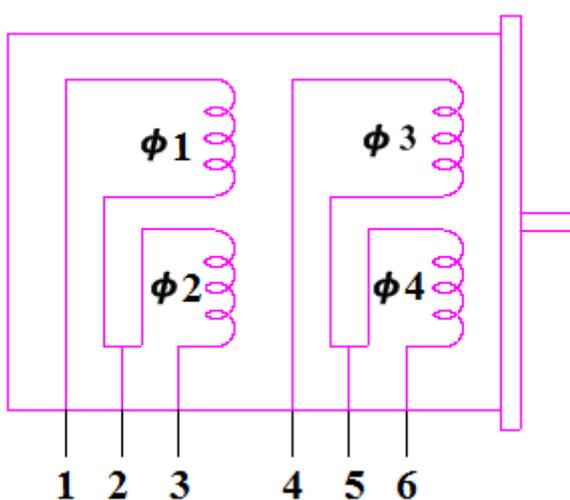


Fig. 7 - Unipolar SM

As a result, unipolar motors have five or six wires. In any case of the number of wires, unipolar motors are driven in the same way. The center tap wire(s) is tied to a power supply and the ends of the coils are alternately grounded (i.e. the center of the unipolar use tapped windings and can use a single power supply). SM here has four phases labeled as $\phi 1 - \phi 4$. Unipolar SM is often been known as "four-phase SM", on the other hand, this name typically complicates many publics since it is an incorrect style, and it will be more reasonably and accurately to fix its name as "dual-phase 6-wires SM", when we take into account many its structural features, for instance, it only contains two phases and has two group coils with center terminals, and connects with external by its six wires.

b) Bipolar Motors:

A bipolar stepper motor has one winding per stator phase. A two-phase bipolar stepper motor will have 4 leads as shown in Fig. 8. In a bipolar stepper we don't have a common lead like in a unipolar stepper motor. A bipolar stepper motor has an easy wiring arrangement but its operation is a little complex.

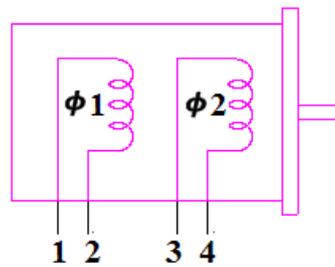


Fig. 8 - Bipolar SM

The current runs through whole coil instead only half coil as in a unipolar motor. As a result, the bipolar motor will produce more torque than unipolar motor of the same size. Compared to unipolar motors, the bipolar motor is uncomplicated in structure but necessitates a positive and negative source and extra complex switching electric circuit. Current in the coil of a bipolar motor is bidirectional. This needs altering the polarity of both ends of the coils.

In order to drive a bipolar stepper, we need a driver IC with an internal H bridge circuit. This is because, in order to reverse the polarity of stator poles, the current needs to be reversed. This can only be done through an H bridge.

Bipolar stepper motors have four lead wires and require a total of eight drive transistors (i.e., two full H-bridges).

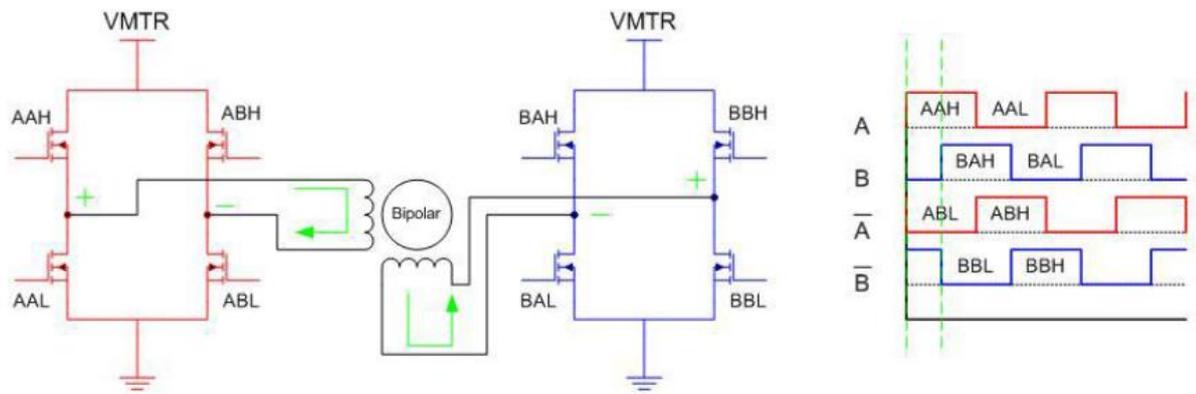


Fig. 9 - Bipolar Motor and Drive

Types of Stepper Motors According to the Rotor Types:

There are three types of stepper motors according to the rotor construction:

a) Variable Reluctance Stepper Motor

In this motor, a nonmagnetic iron core rotor is used, which winding has turned on its surface. The stator is same as used in the Permanent Type Stepper Motor.

The direction of motor rotation is independent of the polarity of the stator current. It is called variable reluctance motor because the reluctance of the magnetic circuit formed by the rotor and stator teeth varies with the angular position of the rotor.

- Here Non-magnetic iron core is used as a rotor.
- Stator is electromagnetic winding around rotor.
- Rotor consists of teeth. These teeth are attracted towards energized winding as the magnetic path is generated around coil and rotor.
- Rotor experiences torque and aligns with energized coil to minimize the flux path.
- Now if next winding is energized then the rotor will move towards it.
- In this way, continuous a sequence of winding pulses cause rotor to rotate continuously.
- Note that rotor teeth are arranged in such manner, that at a time only one rotor teeth and energized winding coil pair will align while other teeth slightly deviate with other windings. As shown in the figure below, energized winding C aligns with rotor teeth.

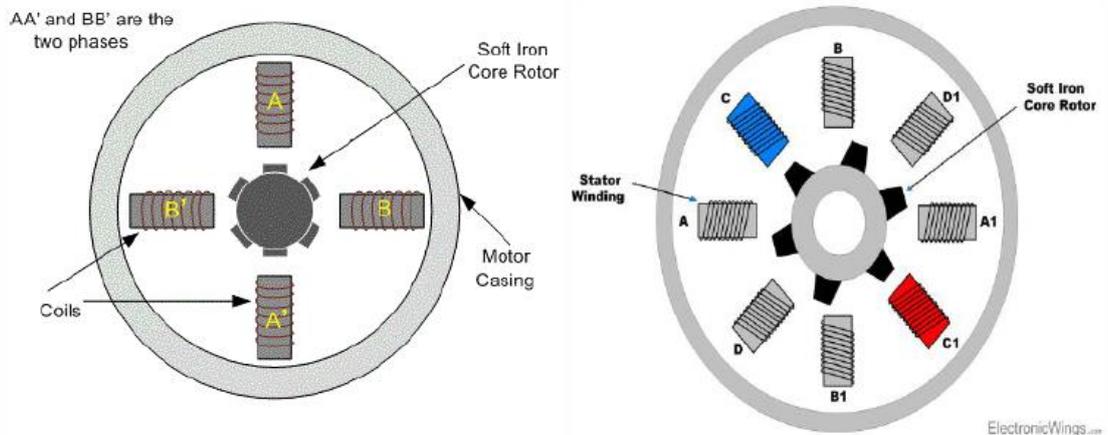


Fig. 10

b) Permanent Magnet Stepper Motor

It also has wound stator poles but its rotor poles are permanently magnetized. It has a cylindrical rotor. Its direction of rotation depends on the polarity of the stator current.

The rotor is made of a permanent-magnet material like magnetically “hard” ferrite, the stator has projecting poles but the rotor is cylindrical and has radially magnetized permanent magnets.

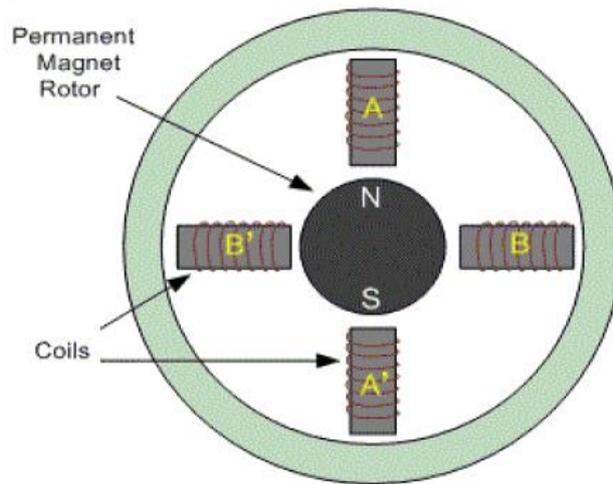


Fig. 11

c) Hybrid Stepper Motor

The word Hybrid means combination or mixture. The **Hybrid Stepper Motor** is a combination of the features of the Variable Reluctance Stepper Motor and Permanent Magnet Stepper Motor. The Hybrid type motor, as the name suggests is a mixture of both the above types. This consists of a rotor that is magnetic (as Permanent Magnet Stepper Motor) and as well as teathed (as Variable Reluctance Stepper Motor).

The diagram of the construction of this motor is shown below: It is best suited when small step angles of 1.8° , 2.5° etc. are required.

The rotor of this type of motor is made up of two rotors joining like a shaft of the motor. One of them is for north and the other is for the South Pole. These poles arrange in an alternative manner as they designed in such a manner.

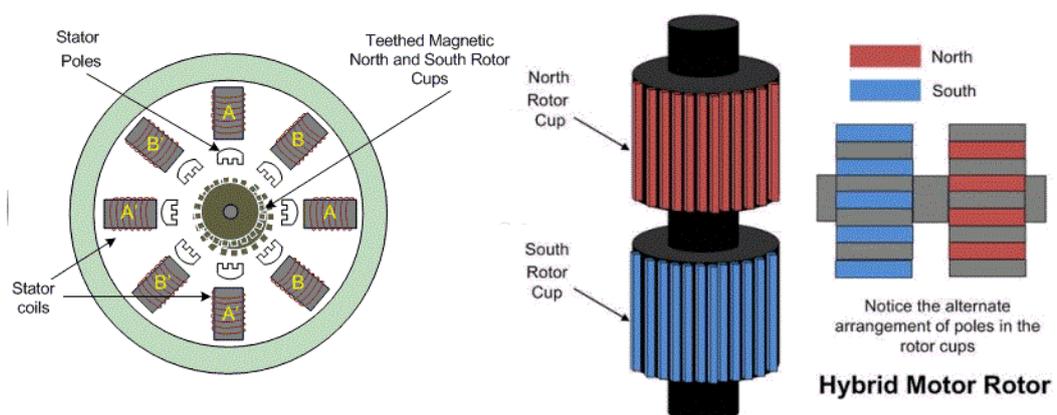


Fig. 12

Types of Stepping Excitation Methods:

The mode of technique is determined by the step arrangement applied to the coils of the motor.

1. Wave Stepping Excitation Method (One Phase ON Excitation Method):

In the wave stepping excitation method, only one phase winding is energized at a period as shown in the schedule (1). Steps are directed in instruction from one to four. After step four, the order is repetitive from step one; it makes the motor rotate clockwise, reversing the order of step from four to one will make the motor rotate counter-clockwise as shown in table and figures.

Sequence of wave stepping excitation method

Clockwise Direction					Counter-Clockwise Direction				
Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$
1	ON	OFF	OFF	OFF	1	OFF	OFF	OFF	ON
2	OFF	ON	OFF	OFF	2	OFF	OFF	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	OFF	3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	OFF	OFF	ON	4	ON	OFF	OFF	OFF

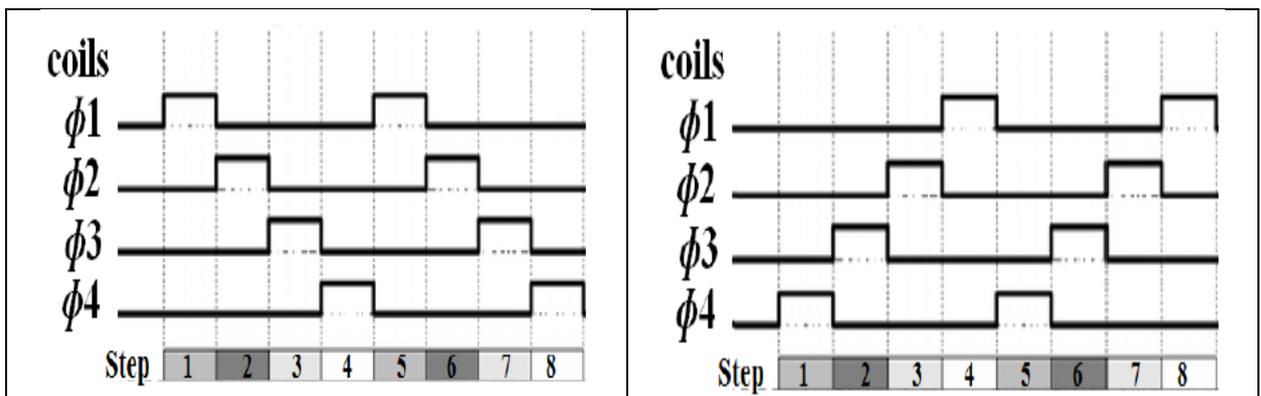


Fig. 13 - Sequence of wave stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

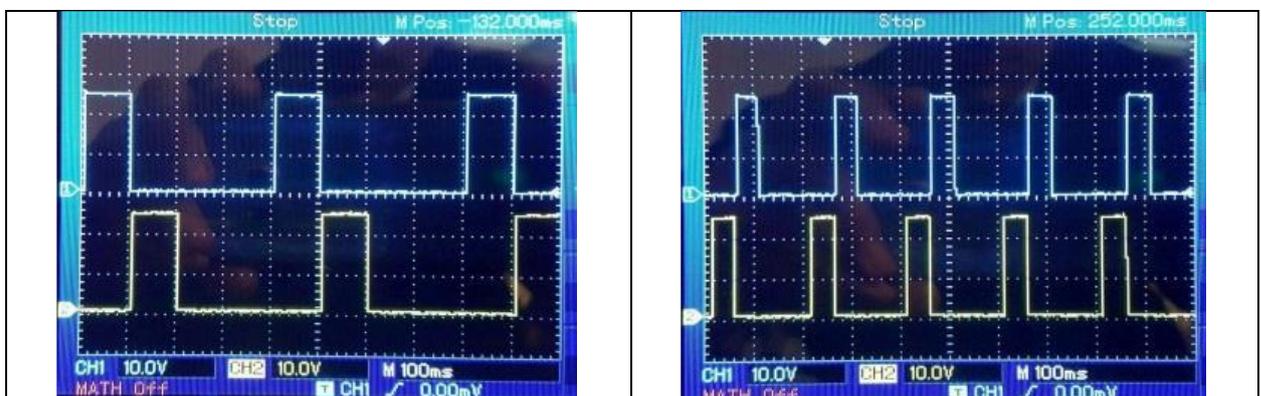


Fig. 14 - Experimental result shows the sequence of wave stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

This method of excitation produces smooth revolutions and the smallest power exhaustion of the three methods, while it has the lower torque than other stepping methods. It is the least stable at higher speeds [4].

2. Full Stepping Excitation Method (Two-Phase ON Excitation Method):

Two windings are excited simultaneously at a time. This method is also called full-step excitation since it causes rotation in full natural steps. The order in which coils has to be energized is given in the table (2-a). As in one phase mode, the reversing order makes it turn counter-clockwise as in the table and figures below.

Sequence of two-phase on stepping excitation method

Clockwise Direction					Counter-Clockwise Direction				
Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
2	1	1	0	0	2	0	1	1	0
3	0	1	1	0	3	1	1	0	0
4	0	0	1	1	4	1	0	0	1

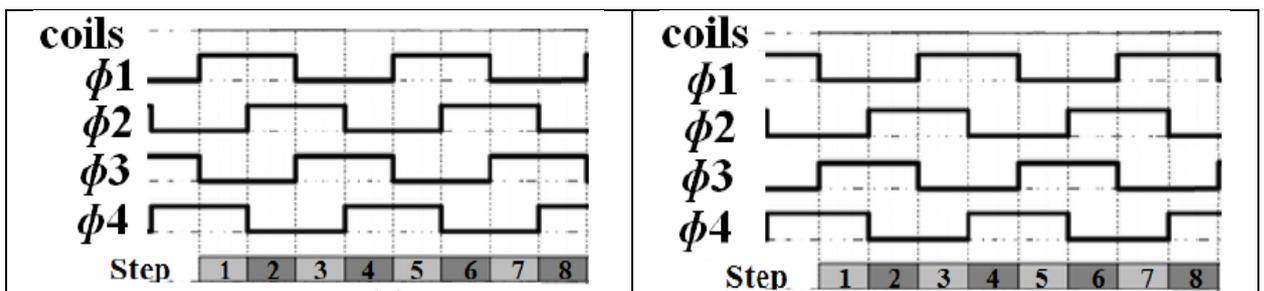


Fig. 15 - Sequence of full stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

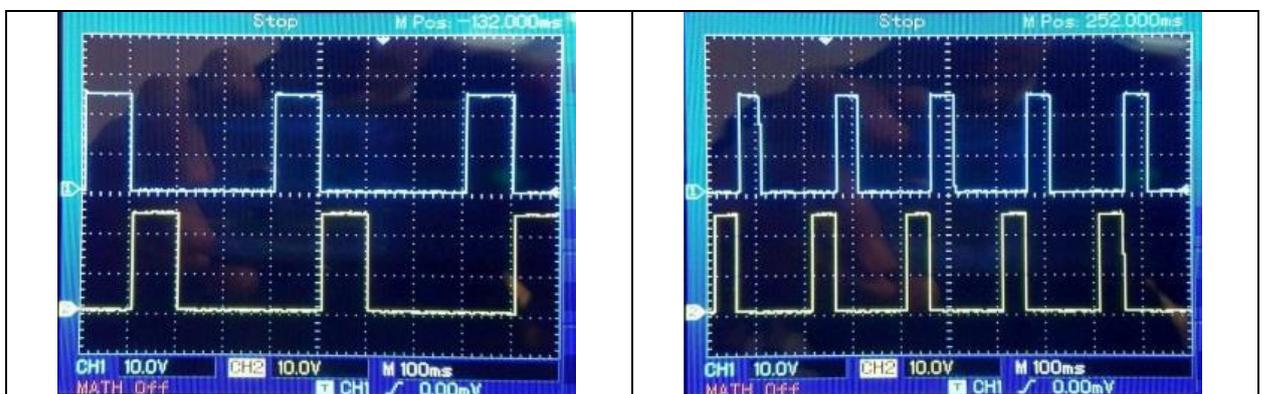


Fig. 16 - Experimental result shows the sequence of full stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

In this mode, motion is not as smooth as in the previous mode, power consumption is more important but it produces greater torque (full rated torque) because the polarity of the input is reversed for one of the phases each time to trigger a new step.

3. Half Stepping Excitation:

Half-stepping control alternates between energizing one phase and two phases simultaneously (i.e. half step sequence is a mix of wave stepping and full stepping sequences). In this method of excitation, the motor step angle reduces to half the angle in full mode. So the angular resolution is also increased (i.e. it becomes double the angular resolution in full mode). Also in half mode sequence the number of steps gets doubled as that of full mode. For example, a stepper motor of 24 steps of 15° each "becomes", when we use half step mode, a stepper motor of 48 steps of 7.5°.

Sequence of half step excitation method

Clockwise Direction					Counter-Clockwise Direction				
Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	Step	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$
1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
2	1	0	0	0	2	0	0	1	1
3	1	1	0	0	3	0	0	1	0
4	0	1	0	0	4	0	1	1	0
5	0	1	1	0	5	0	1	0	0
6	0	0	1	0	6	1	1	0	0
7	0	0	1	1	7	1	0	0	0
8	0	0	0	1	8	1	0	0	1

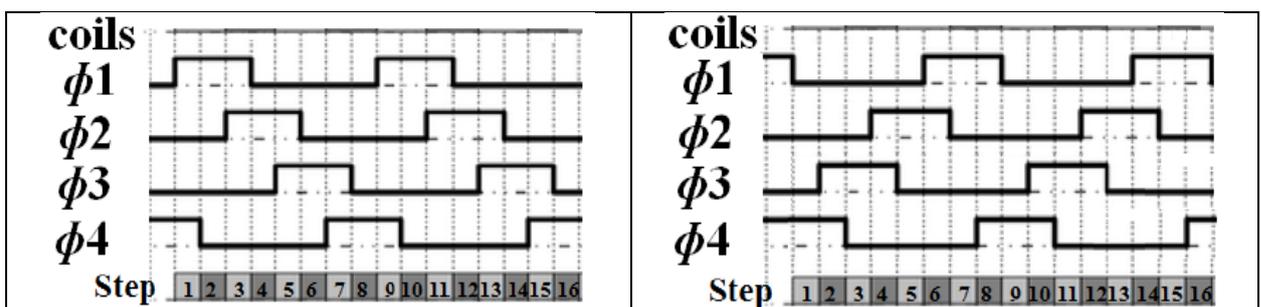


Fig. 17 - Sequence of half stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

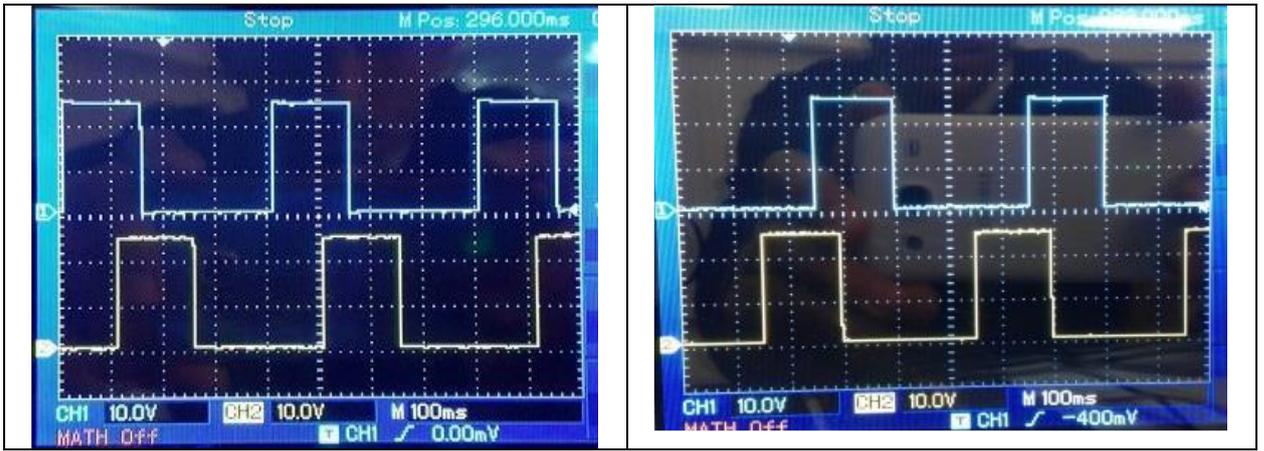


Fig. 18 - Experimental result shows the sequence of half stepping excitation method: Clockwise, Anticlockwise

The half-step sequence has the most torque and is the most stable at higher speeds. It also has the highest resolution of the main stepping methods; therefore this type of stepping excitation is preferred over full mode.

PLC Controlled Stepper Motor

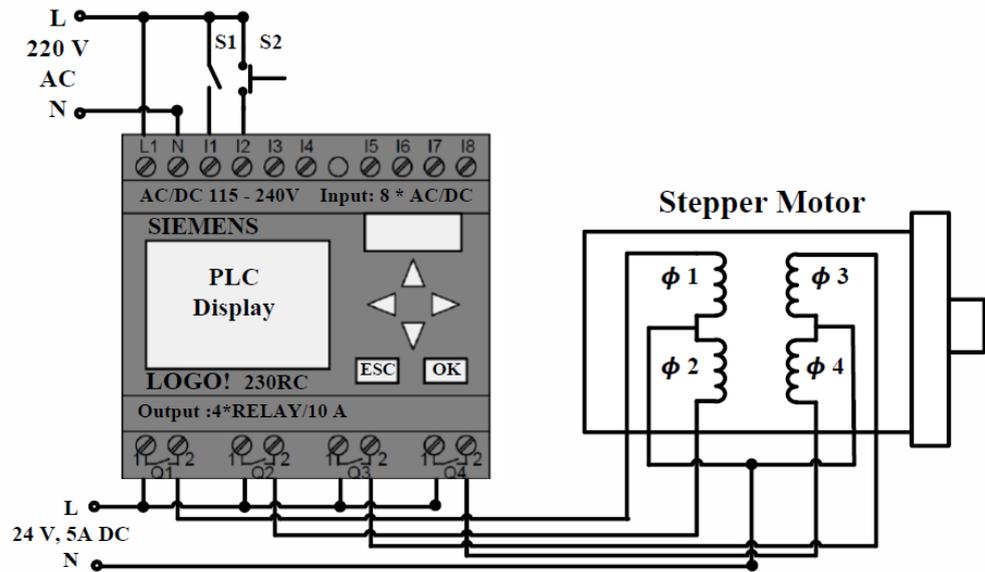


Fig. 19

In this work the motion control algorithm of stepper motor has been performed successfully, it involved the control of:

1. **Stepper motors speed:** The pulse period determines the angular speed of the stepper motors.
2. **No. of steps** (No. of rotations): The number of input electrical pulses is directly proportional to the angular displacement.
3. **The direction of revolution** (clockwise or anticlockwise): To change the direction you have to change the sequence of pulses applied to its coils.

PLC Controlled Multiple Stepper Motors

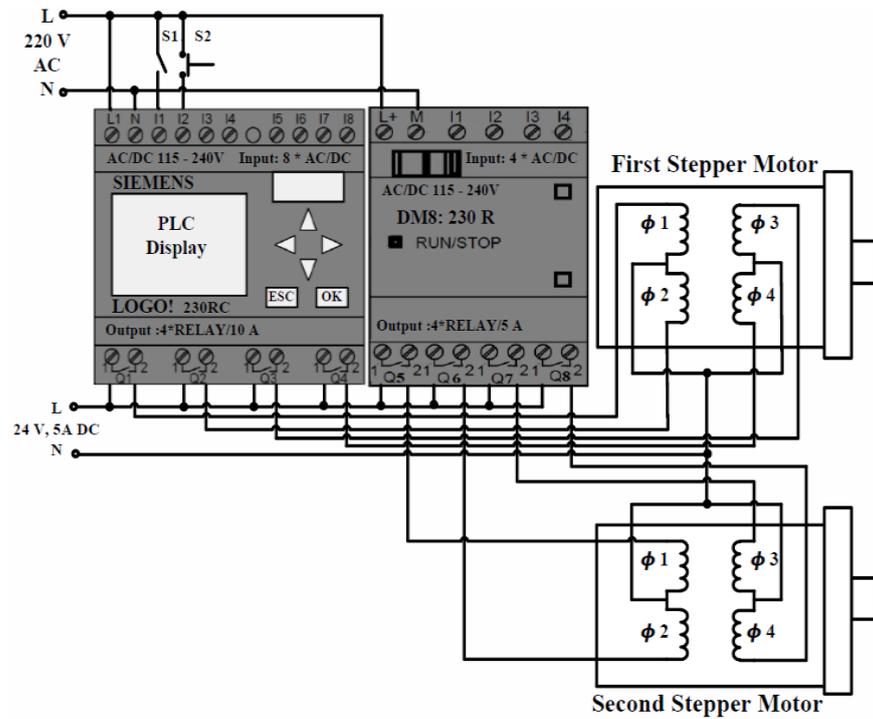


Fig. 20

In this work the motion control algorithm of multiple stepper motors has been performed successfully, it involved the control of:

4. **Stepper motors speed:** The pulse period determines the angular speed of the stepper motors.
5. **No. of steps** (No. of rotations): The number of input electrical pulses is directly proportional to the angular displacement.
6. **The direction of revolution** (clockwise or anticlockwise): To change the direction you have to change the sequence of pulses applied to its coil.

References

- 1) S. Motor, D. Considerations, and C. Problems, "APPLICATION NOTE STEPPER MOTOR DRIVER CONSIDERATIONS," no. December 2003, pp. 1–11.
- 2) Stepping Motor Tutorial by Dr. Douglas W. Jones (<http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/#introduction>), Copyright 1995
- 3) Stepper Motor Tutorial by Rustie Laidman (<http://209.41.165.153/stepper/>), Copyright 2000
- 4) Article: The Rise of VSR Motor, Greg Paula, Mechanical Engineering Magazine; Copyright 1998 by The American Society of Mechanical Engineers
- 5) Drive Circuit Basics, Industrial Circuits Application Notes, (<http://library.solarbotics.net/pdflib/pdf/drive.pdf>)
- 6) AN822, Stepper Motor Microstepping with PIC18C452, Microchip Technology Inc.

- 7) The Handbook of Small Electric Motors, Yeadon and Yeadon, Eds, McGraw Hill, 2001
- 8) [HTTP://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/](http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/)
- 9) Shinano Kenshi Corporation, (<http://www.shinano.com/stepper.htm>)