

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 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Многокоординатный прецизионный позиционер на базе сервоприводов УДК: 681.58-8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Фоменко Евгений Александрович		

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, доцент		

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.	профессор д.т.н		

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

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Фоменко Евгению Александровичу

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>Привод, необходимый для перемещения в пространстве в двух осях оборудования массой до 40 кг.</p> <p>Используемые линейные синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов - LP32-539-75C-DT3-1000-N0-B.</p> <p>Максимальная линейная скорость – не менее 5 м/с.</p> <p>Максимальное ускорение – не менее 20 м/с².</p> <p>Среднеквадратическое отклонение статической ошибки отработки положения ИЦ - не более 0,005 м.</p> <p>Абсолютные значения динамических погрешностей воспроизведения синусоидальных сигналов по положению (с амплитудой скорости не более 60% от максимальной), измеренные по первой гармонике сигнала отработанного положения в полосе рабочих частот:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по амплитуде, не более 10%; – по фазе, не более 10° <p>Электропитание узла цели должно осуществляться от трехфазной сети переменного тока с напряжением (400±40) В, частотой (50±0,4) Гц с заземленным нулевым проводом.</p> <p>Максимальная потребляемая мощность составляет 100 кВт.</p> <p>Для организации работы должен быть использован интерфейс Ethernet.</p> <p>Наличие тестового ПО, обеспечивающего возможность проведения испытаний ДУЦ.</p>
---	--

	Время непрерывной работы должно быть не менее 1200 с., время перерыва не более 600 с. при работе всех каналов на максимальных режимах.
<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. Кинематическое описание системы и его технологического процесса Раздел 2. Разработка системы многокоординатного электропривода Раздел 3. Математическое моделирование линейного двигателя и настройка регуляторов сервосистемы Раздел 4. Разработка программного обеспечения для осуществления многокоординатного движения Раздел 5. Разработка методики проведения испытаний. Результаты экспериментов Заключение Список литературы Приложения</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>- электрическая схема общая блока управления системой - имитационные модели электропривода - графики переходных процессов электропривода</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(если необходимо, с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Каракулов Александр Сергеевич
Социальная ответственность	Фех Алина Ильдаровна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Иностранный язык	Качалов Н.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Обзор на аутентичную литературу по теме «Разработка многокоординатной линейной системы для прецизионного позиционирования»	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2020 г.
---	---------------

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	Фоменко Евгений Александрович		

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	Описание кинематики выбранного электропривода	3
11.04.2020	Разработка системы двухкоординатного позиционера	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	Фоменко Евгению Александровичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

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 365000 рублей, в том числе затраты на оплату труда не более 275000 рублей.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	14 % материальные расходы 50 % расходы на оплату труда 14% накладные расходы 30% районный коэффициент Значение показателя интегральной ресурсоэффективности 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	Фоменко Евгений Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Фоменко Евгению Александровичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

Тема ВКР:

Многокоординатный прецизионный позиционер на базе сервоприводов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Работа посвящена вопросам разработки и исследования многокоординатного прецизионного позиционера на базе сервоприводов.</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>Выявленные вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> — шум — недостаток естественного света — воздействие электромагнитного излучения <p>Выявленные опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Поражение электрическим

	<i>током;</i>
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:	<i>Наиболее вероятные ЧС в здании в момент проведения исследования – пожар и поражение электрическим током;</i>

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	Фоменко Евгений Александрович		.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 179 с., 51 рисунок, 49 таблиц, 38 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель, линейный двигатель, постоянные магниты, система управления, положение, сервоусилитель, математическая модель, многокоординатное движение.

Объектом исследования является двух координатный электропривод на базе синхронных электродвигателей с постоянными магнитами с датчиками обратной связи.

Цель работы – разработка электропривода перемещения груза и определение с учетом имеющихся в наличии компонентов системы максимально достижимых характеристик по скорости, ускорению, позиции, возможности осуществления сплайнового движения.

В процессе исследования проводился кинематический обзор изделия, его технологического процесса, была разработана система многокоординатного электропривода, произведено математическое моделирование линейного двигателя и настройка регуляторов сервосистемы, разработано программное обеспечение для осуществления многокоординатного движения, а также разработаны программа методики проведения испытаний и проведены эксперименты на оборудовании.

Проведена проверка безопасности и экологичности проекта, также рассчитана экономическая эффективность модернизации оборудования.

Объектом исследования работы является линейный синхронный электродвигатель с постоянными магнитами

Предметом исследования являются цифровые системы управления линейных электродвигателей с постоянными магнитами.

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 будет применена для реализации многокоординатного движения сервопривода на базе сервоконтроллера РСММ, разработанной компанией Kollmorgen, с последующим внедрением в реальный проект прецизионной системы наведения для Уральского проектно-конструкторского бюро «Деталь» (УПКБ «Деталь»)

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013. Расчеты произведены в программной среде MathCAD 2015. Имитационное моделирование выполнено с использованием программы Simulink/Matlab 2012. Моделирование выполнено с использованием программного обеспечения DriveGUI v.3.4.0 и Kollmorgen Automation Suite Integrated Development Environment (KAS IDE) v. 3.02.

Оглавление

Введение	13
1. Кинематическое описание системы и его технологического процесса	15
1.1 Описание разрабатываемого изделия	15
1.2 Описание технологический процесс изделия	18
1.2.1 Режимы работы изделия	19
2. Разработка системы многокоординатного электропривода	25
2.1. Выбор сервоусилителей	25
2.2. Выбор контроллера движения	29
2.3. Выбор датчиков положения	31
2.4. Выбор моторного дросселя	32
2.5 Выбор автоматических выключателей	33
2.6 Выбор блока питания	34
2.7 Выбор твердотельных реле	36
2.8 Выбор тормозного резистора	37
2.9. Разработка электрической схемы общей	39
3 Математическое моделирование линейного двигателя и настройка регуляторов сервосистемы	43
3.1 Математическая модель линейного синхронного двигателя	43
3.2 Обзор утилиты для работы с сервоусилителями	49
3.3 Процесс настройки регуляторов сервоусилителей	56
4 Разработка программного обеспечения для осуществления многокоординатного движения	62
5 Разработка методики проведения испытаний. Результаты экспериментов	73
5.1 Общие положения, условия и порядок проведения испытаний	74
5.2 Методы проведения испытаний	75
5.3 Порядок проведения испытаний оборудования и их результаты	81
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	93
6.1 Потенциальные потребители результатов исследования	93
6.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	95
6.3 FAST-анализ	98
6.4 Диаграмма Исикава	104
6.5 SWOT-анализ	104
6.6 Оценка готовности проекта к коммерциализации	109
6.7 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	110
6.8 Инициация проекта	111
6.9 Планирование управления научно-техническим проектом	113
6.9.1 Иерархическая структура работ проекта	113
6.9.2 Контрольные события проекта	114
6.9.3 План проекта	115
6.9.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	116
6.10 Материальные расходы	117

6.10.1 Амортизация	118
6.10.2 Основная заработная плата	119
6.10.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	120
6.10.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	121
6.10.5 Накладные расходы	122
6.10.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	122
6.10.7 Матрица ответственности	123
6.11 Определение ресурсоэффективности проекта	124
7 Социальная ответственность	129
7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	129
7.2 Производственная безопасность.....	134
7.3 Описание технологического процесса и рабочего места	135
7.4 Анализ опасных производственных факторов и образование мероприятий по их устранению	135
7.4.1 Шум и вибрации	137
7.4.2 Микроклимат	140
7.4.3 Освещение.....	141
7.5 Экологическая безопасность.....	143
7.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	145
Заключение	149
Список использованной литературы.....	151
Приложение I.....	155

Введение

Развитие техники, в особенности в отраслях автоматизированного изготовления, робототехники и средств обработки, а также передачи информации значительно расширяет количество условий, предъявляемых к исполнительным электромеханическим аппаратам. В первую очередь это касается сфер, сопряженных со созданием роботов, а также манипуляторов. Для электромеханического привода предъявляется требование преобразовывать командные сигналы в механическое передвижение, обеспечивая при этом стабильную работу привода в абсолютно всем рабочем диапазоне. Во определенных вариантах закономерности преобразования командных сигналов в механическое передвижение до такой степени трудны, что недостижимо их осуществить с помощью самых распространенных электромеханических аппаратов. В данном случае используют исполнительные устройства, контролируемые с помощью микроконтроллера. [1]

Одним из наиболее используемых устройств электропривода по совокупности технических и эксплуатационных характеристик являются линейные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Данный тип двигателей может обеспечивать устойчивую и бесперебойную работу приводов. Двигатели обеспечивают устойчивую работу привода в режимах с высокой динамикой, им свойственен высокий коэффициент полезного действия, а так же могут быть реализованы в малых габаритах, что особенно важно в космической технике, или при создании автономных роботов и в военных отраслях. Бесколлекторные двигатели обеспечивают относительно низкий уровень, создаваемый ими уровень радио и акустических помех. [2]

Эти качества электрической машины обуславливают применение в:

- приводах подач и главного движения металлорежущих станков,
- координатных устройствах,
- упаковочных и печатных машинах,
- принтерах и плоттерах,
- намоточных и лентопротяжных механизмах,

- прецизионных системах слежения и наведения.

Возможность получения высокостабильного или точного управления, широкий диапазон регулирования скорости, высокая помехоустойчивость, малые габариты и вес часто являются решающим фактором их применения.

В данной работе создан двухкоординатный прецизионный позиционер на базе указанных в техническом задании линейных синхронных двигателей и произведено определение максимальнодостижимых динамических характеристик привода. В процессе создания позиционера была разработана система управления, удовлетворяющая требованиям по обеспечению питания, управления двигателями, точности позиционирования подвижной каретки.

Для настройки сервосистемы были рассмотрены подходы к моделированию математической модели линейного синхронного двигателя, произведена оптимизация контуров управления.

Для решения задачи реализации многокоординатного движения было разработано программное обеспечение, позволяющее описывать произвольную траекторию (в данном случае синусоиду), а также имеющее минимально необходимые функции для начала работы с изделием.

Для проверки соответствия изделия требованиям технического задания была разработана методика проведения испытаний, общие положения, условия и порядок проведения испытаний.

На основании программы и методики испытаний было произведено моделирование работы созданного изделия. По результатам моделирования был произведен анализ полученных данных, который четко отражает зависимость максимально возможных скоростных характеристик от перемещаемой массы (вертикальной мачты).

Основываясь на этих данных, был сформирован список рекомендаций, которые необходимо применить для полного соответствия изделия требованиям технического задания.

1. Кинематическое описание системы и его технологического процесса

1.1 Описание разрабатываемого изделия

Динамический узел цели (ДУЦ), предназначен для автономного перемещения имитатора цели (ИЦ) в картинной плоскости, а также передачи в стойку управления (СУ) информации о состоянии ДУЦ.

ДУЦ и его составные части выполняют перемещение кареток с ИЦ в картинных плоскостях по линейным осям ОХ и ОУ посредством высокоточных безредукторных линейных синхронных электроприводов.

Технические характеристики ДУЦ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики ДУЦ

Характеристики	Значение
1 Габаритные размеры (Д x Ш x В), мм	14340x3079x 14542
2 Диапазон движения каретки по оси ОХ, ограниченный концевыми выключателями, мм	11666
3 Диапазон движения каретки по оси ОУ, ограниченный концевыми выключателями, мм	12297
4 Точность установки по осям движения, мм	5
5 Максимальная скорость движения каретки, м/с, не менее	5
6 Минимальная скорость движения каретки, м/с, не более	0,01
7 Ускорение движения каретки, м/с ² , не менее	20
8 Масса, кг	18630,6

Продолжение таблицы 1

9 Масса мачты, кг	450
10 Максимальная потребляемая мощность, кВт	100
11 Максимальная масса нагрузки на каретку, кг, не более	30
12 Напряжение питания от трехфазной сети, В	400 ± 40
13 Частота питания от трехфазной сети, Гц	$50 \pm 0,4$

Опорно-поворотное устройство (ОПУ) включает в себя раму ДУЦ, линейную ось X и линейную ось Y. Общий вид ОПУ ДУЦ представлен на рисунке 1.

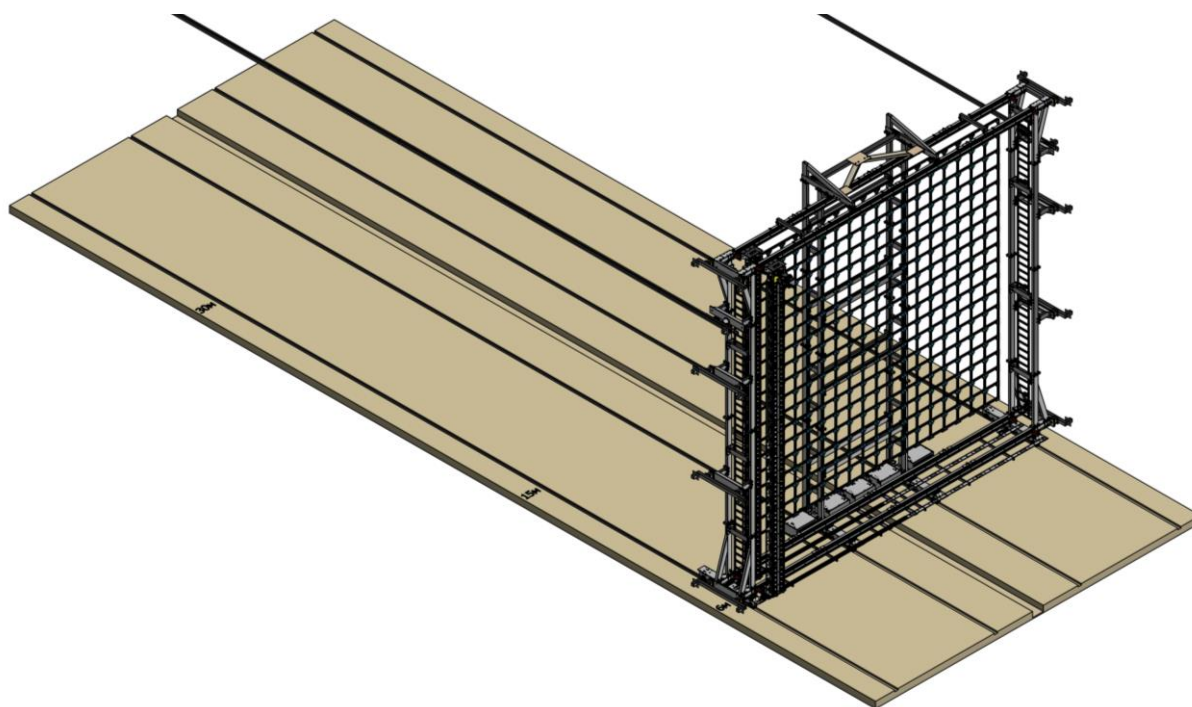


Рисунок 1 – Общий вид ОПУ



Рисунок 2 – Фотография собранного изделия ДУЦ

Рисунок, отражающий кинематику передвижной каретки линейной оси изделия представлен на рисунке 3. [3]

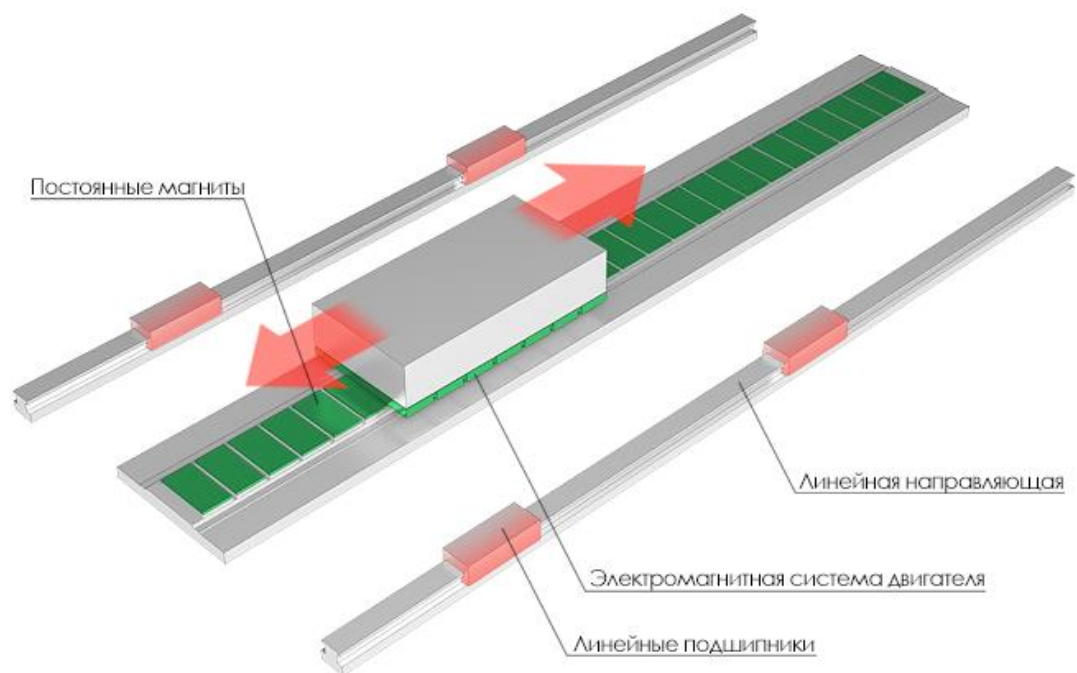


Рисунок 3 – Отражение кинематики линейного привода

Габаритный чертеж изделия представлен на рисунке 4.

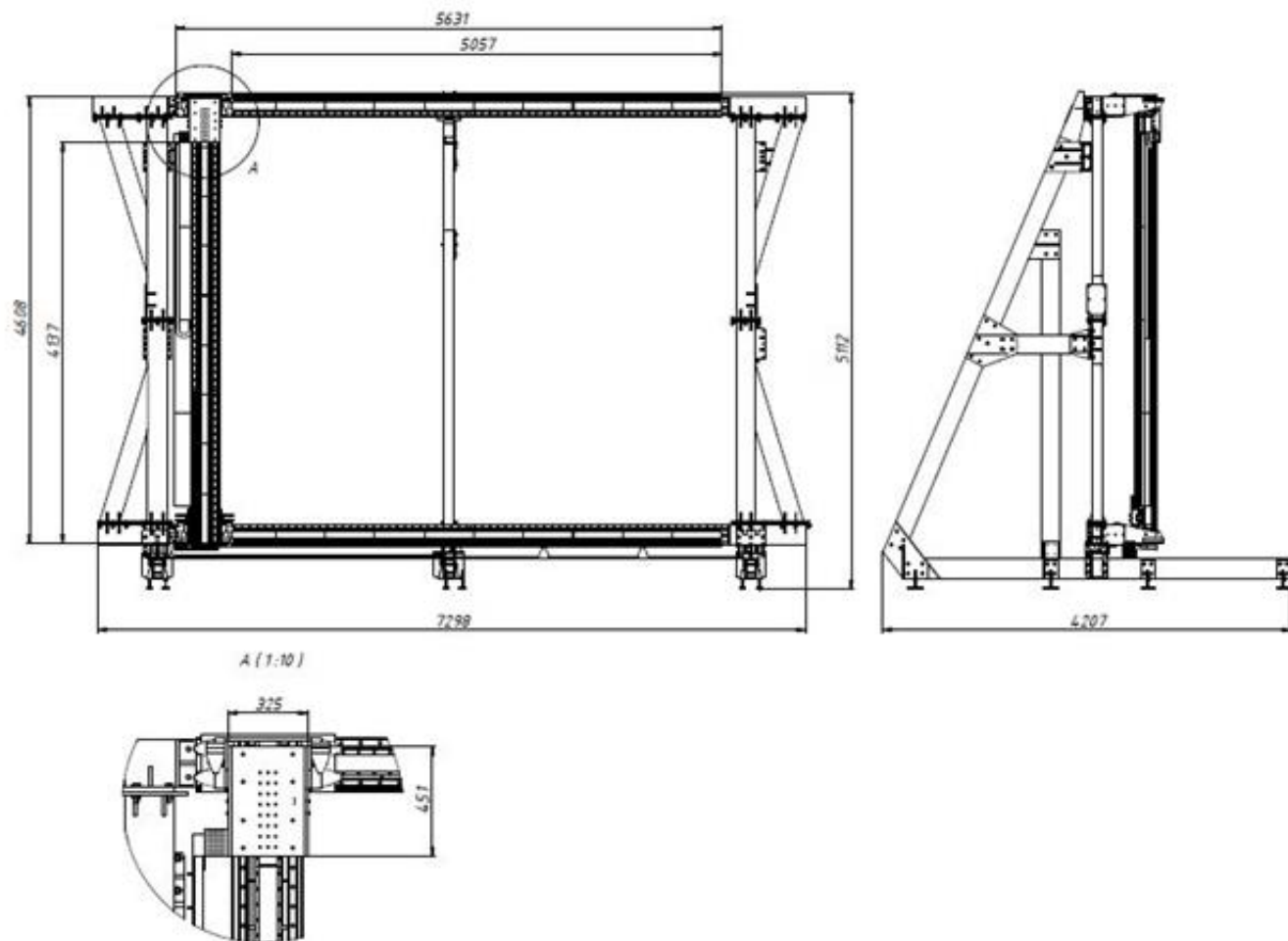


Рисунок 4 – Чертеж изделия с габаритными размерами

1.2 Описание технологический процесс изделия

Технологический процесс заключается в следующем: оператор задает произвольную траекторию движения каретки и мачты ДУЦ. На каретке установлено устройство доворота имитатора цели. Настоящая система состоит из одной независимой мишени,двигающихся в вертикальном (Y) и горизонтальном (X) направлении с ИК излучателем, постоянно направленным на ИК ракетную головную часть. Проектируемое изделие будет использоваться вместе со стендом имитации полёта, что должно будет максимально близко к реальности моделировать движение мишени, а также отслеживать это устройство для системы управляемых ракет. [4]

1.2.1 Режимы работы изделия

Работа ДУЦ в режиме ручного управления.

Режим ручного управления заключается в управлении движением кареток ДУЦ, используя ПДУ.

На ПДУ установлено программное обеспечение, имеющее удобный интерфейс и все необходимые органы управления движением кареток ДУЦ.

Программное обеспечение (ПО) ПДУ выводит на экран монитора персонального компьютера (ПК) ПДУ индикаторы состояния, которые служат для сигнализации о неправильности заданных параметров движения, если они выходят за допустимые пределы.

С помощью органов управления ПО ПДУ (кнопок) можно подавать питание на двигатели ДУЦ и снимать его путем нажатия на кнопки «Включить» и «Выключить». Также, с помощью ПО ПДУ есть возможность установки скорости и ускорения движения кареток, путем задания значений в поля «Скорость» и «Ускорение». У каждой из кареток свои поля для задания параметров движения и при желании они могут отличаться друг от друга.

ПО ПДУ позволяет выполнять поиск начального положения кареток и УДИЦ, а также позиционировать каретки ДУЦ в трех режимах движения. Начальным положением кареток ДУЦ является крайнее левое положение на оси, для УДИЦ начальным положением является точка когда УДИЦ расположены параллельно ОПУ ДУЦ. Текущая позиция кареток ДУЦ всегда отображается в поле «Текущая позиция», расположенном в главном окне ПО ПДУ в данном режиме управления.

Поиск начального положения выполняется путем нажатия кнопки «Поиск начального положения», расположенной в окне ПО ПДУ. Поиск начального положения считается законченным и успешно выполненным, когда загорится зеленый индикатор «В нуле» и текущая позиция кареток будет равна 00000.0 мм.

Первый режим движения – это движение «Вверх», «Вниз», «Вправо» и

«Влево», путем удержания соответствующих кнопок. Движение каретки начинается сразу после нажатия на кнопку со скоростью и ускорением, заданными в полях «Скорость» и «Ускорение» и завершается после ее отпускания. Если каретка находится в одном из крайних положений, при попытке позиционировать ее за допустимый предел движения, определяемый концевыми выключателями, сработает индикатор ошибки движения, расположенный в окне ПО ПДУ и будет выполнен останов движения.

Второй режим движения – это относительное движение, т.е. движение на заданное расстояние. Данный режим движения осуществляется путем нажатия на кнопку «Относительное движение» расположенную в окне ПО ПДУ. Движение будет производиться относительно текущего положения каретки и с учетом значения заданного оператором в поле справа от кнопки. Расстояние задается оператором в миллиметрах.

Третий режим движения – это абсолютное движение, т.е. движение в указанную позицию. Данный режим движения осуществляется путем нажатия на кнопку «Абсолютное движение» также расположенную в окне ПО ПДУ. Движение будет производиться относительно начального положения каретки и с учетом значения заданного оператором в поле справа от кнопки. Конечная позиция задается оператором в миллиметрах.

Работа ДУЦ в режиме автономного тестирования

Режим автономного тестирования обеспечивает возможность проведения испытаний в объеме, а также возможность проведения быстрого тестирования.

Тестирование осуществляется с использованием ПО, установленного на ПК ПДУ. Автономное тестирование может быть проведено как в полном объеме, так и выборочно.

Быстрое тестирование производится после полной инициализации ДУЦ и должно быть произведено после каждого полного цикла выключения и включения питания ДУЦ.

Быстрое тестирование может быть начато с ПДУ, используя встроенное ПО. Запуск быстрого тестирования осуществляется путем выбора вкладки «Автономное тестирование» расположенной в окне ПО ПДУ и нажатия кнопки «Быстрое тестирование».

Быстрое тестирование производится автоматически, без участия оператора. Во время быстрого тестирования каретки ДУЦ двигаются на малых скоростях, составляющих 100 мм/с с ускорением 400 мм/с², по всей длине оси от начального положения и до крайнего правого концевого выключателя.

На первых этапах тестирования каретки ДУЦ двигаются сначала по одной из осей – вертикальной или горизонтальной, а потом по другой. Тестирование проводится по отдельности для каждой каретки. На заключительных этапах каретки двигаются вместе, синхронно и сразу по обеим осям.

Текущая позиция кареток ДУЦ всегда отображается во вкладке «Автономное тестирование» в окне ПО ПДУ в данном режиме управления. После окончания быстрого тестирования в этом же окне соответствующая индикация посредством вывода сообщения сигнализирует об успешном прохождении тестирования и готовности ДУЦ к дальнейшей работе.

По результатам работы режима «Автономное тестирование» оператору предлагается получить лог-файл, т.е. файл с записями о событиях в хронологическом порядке и результатами проведения испытаний.

Работа ДУЦ в режиме тестирования от внешнего компьютера

Для проведения тестирования ДУЦ от внешнего ПК после инициализации следует подключиться к БУ ДУЦ по сети Ethernet.

Тестирование от внешнего компьютера производится путем использования ПО оператора ДУЦ и представляет собой режим похожий на режим «Автономное тестирование» с той лишь разницей, что тестирование производится без использования ПДУ. Параметры тестирования могут быть заданы оператором.

Режим тестирования от внешнего компьютера представлен в виде вкладки

в ПО оператора ДУЦ, повторяющей вкладку «Автономное тестирование» из ПО ПДУ.

В данной вкладке расположены все необходимые для тестирования органы управления движением кареток ДУЦ, а также индикаторы состояния, которые служат для сигнализации о неправильности заданных параметров движения, если они выходят за допустимые пределы. ПО оператора ДУЦ непрерывно производит опрос БУ ДУЦ на наличие ошибок соединения и движения. Также в ПО оператора непрерывно отображается текущее положение кареток в мм.

С помощью органов управления вкладки «Режим тестирования» ПО ДУЦ можно подавать питание на двигатели ДУЦ и снимать его путем нажатия на кнопки «Включить» и «Выключить». Также, с помощью полей, расположенных на данной вкладке, есть возможность установки скорости и ускорения движения кареток, путем задания значений «Скорость» и «Ускорение». У каждой из кареток свои поля для задания параметров движения и при желании они могут отличаться друг от друга.

В данном режиме имеется возможность выполнять поиск начального положения кареток, а также позиционировать каретки ДУЦ в трех режимах движения.

Текущая позиция кареток ДУЦ в режиме тестирования от внешнего ПК всегда отображается в главном окне ПО оператора.

Поиск начального положения выполняется путем нажатия кнопки «Поиск начального положения», расположенной во вкладке «Режим тестирования» ПО ДУЦ. Поиск начального положения считается законченным и успешно выполненным, когда загорится зеленый индикатор «В нуле» и текущая позиция кареток будет равна 00000.0 мм.

Первый режим движения – это движение «Вверх», «Вниз», «Вправо» и «Влево», путем удержания соответствующих кнопок. Движение каретки начинается сразу после нажатия на кнопку и завершается после ее отпускания. Если каретка находится в одном из крайних положений, при попытке

позиционировать ее за допустимый предел движения сработает индикатор ошибки движения, расположенный во вкладке «Режим тестирования» ПО ДУЦ.

Второй режим движения – это относительное движение, т.е. движение на заданное расстояние. Данный режим движения осуществляется путем нажатия на кнопку «Относительное движение» расположенную во вкладке «Режим тестирования» ПО ДУЦ. Движение будет производиться относительно текущего положения каретки и с учетом значения заданного оператором в поле справа от кнопки. Расстояние задается оператором в миллиметрах.

Третий режим движения – это абсолютное движение, т.е. движение в указанную позицию. Данный режим движения осуществляется путем нажатия на кнопку «Абсолютное движение» также расположенную во вкладке «Режим тестирования» ПО ДУЦ. Движение будет производиться относительно начального положения каретки и с учетом значения заданного оператором в поле справа от кнопки. Конечная позиция задается оператором в миллиметрах.

По результатам тестирования оператору предлагается получить лог-файл, т.е. файл с записями о событиях в хронологическом порядке и результатами проведения испытаний, чтобы иметь возможность сравнить их с результатами проведения «Автономного тестирования».

Работа ДУЦ в комплексном режиме

Работа ДУЦ в комплексном режиме осуществляется с использованием ПО ДУЦ, установленное на ПК оператора. Работа в данном режиме возможна после подключения по сети Ethernet.

Комплексный режим представлен в виде вкладки в ПО оператора ДУЦ. На данной вкладке расположены все необходимые для комплексного режима работы органы управления движением кареток ДУЦ, а также индикаторы состояния. ПО оператора ДУЦ непрерывно производит опрос БУ ДУЦ на наличие ошибок соединения и движения, осуществляет контроль зависания. Также в ПО оператора непрерывно отображается текущее положение кареток в миллиметрах.

Перед началом работы в комплексном режиме оператор вводит данные о системе координат эксперимента и о смещении фазовых центров антенных систем радиолокационной станции и ИЦ. Также оператором вносятся параметры юстировки, и с учетом их ПО оператора ДУЦ производит расчет начальных параметров движения кареток ДУЦ и УДИЦ.

После того как начальные параметры моделирования определены, путем нажатия на кнопку «Начать моделирование», расположенную во вкладке «Комплексный режим» оператор начинает моделирование.

Кнопка «Остановить моделирование», расположенная в этой же вкладке служит для остановки движения кареток по траектории.

При работе в комплексном режиме, ПО оператора ДУЦ принимает набор необходимых для моделирования параметров с определенной фиксированной частотой. На основе входных параметров управляющее ПО производит расчет траектории движения кареток с ИЦ по координатам X и Y, а также необходимые скорости и ускорения для своевременного исполнения движения. Дополнительно ПО производит расчет скорости, ускорения и углов поворота УДИЦ на основе параметров движения кареток с ИЦ.

Текущая позиция кареток ДУЦ в комплексном режиме всегда отображается в главном окне ПО оператора.

По результатам моделирования оператору предлагается получить лог-файл, т.е. файл с записями о событиях в хронологическом порядке и результатами моделирования.

2. Разработка системы многокоординатного электропривода

В состав системы управления должны входить: сервоусилители, сервоконтроллер (контроллер движения), датчики положения, моторные дроссели, автоматические выключатели, блок питания, твердотельные реле, тормозные резисторы. [5]

2.1. Выбор сервоусилителей

Поскольку в техническом задании уже предложены необходимые к использованию линейные двигатели выбор по мощности будем производить, опираясь на технические параметры двигателя, которые приведены в таблице 2.

Линейный синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов LP32-539-75C-DT3-1000-N0-B. [6]

Таблица 2 - Технические характеристики линейного двигателя

		LP32-539-	
		GT3-75	
Ширина магнитопровода	He	mm	75
Длина пары полюсов	P	m	0,032
Сила притяжения	Fm	N	8873
Пиковое усилие	Fp	N	2863
Длительное усилие	Fa	N	1210
Длительное стояночное усилие	Fas	N	945
Зубцовое усилие	Fd	N	33
Цикл включения пикового усилия	Da	%	9%
Пиковый ток	Ip	Arms	42,4
Длительный ток	Ia	Arms	12,8

Продолжение таблицы 2

Длительный стояночный ток	I _{as}	Arms	10,0
Ток холостого хода при F _b и V _b	I _{ov}	Arms	0,27
Максимальная частота тока	F _a	Hz	189
Рекомендуемое напряжение питания	U _s	V DC	540
Максимальная скорость при F _p и U _s	V _p	m/s	2,5
Максимальная скорость при F _a и U _s	V _a	m/s	5,0
Максимальная скорость при F=0 и U _s	V _b	m/s	6,1
Сопротивление при 20С *	R _{uv}	Ohm	0,8
Индуктивность *	L _{uv}	mH	16
Электрич. постоянная времени 3LI/4U	T _u	ms	0,92
Константа усилия	K _f	N/Arms	95
Константа противо-ЭДС (В пик *)	K _u	V/(m/s)	77
Константа двигателя	K _o	N/vW	86
Термическое сопротивление якоря	R _{ta}	K/W	0,46
Пиковая рассеиваемая мощность	P _p	W	3066
Длительная рассеиваемая мощность	P _a	W	280
Пиковая механическая мощность	P _{mp}	W	7107
Длительная механическая мощность	P _{ma}	W	6019
Пиковая потребляемая мощность	P _{np}	W	10172
Длительная потребляемая мощность	P _{na}	W	6299
Длина якоря	LF	mm	553
Ширина якоря	WF	mm	105
Высота якоря	HF	mm	43,3
Вес якоря	MF	kg	13,6

Следовательно, учитывая требования технического задания и технические параметры двигателя, подберем сервоусилитель со следующими характеристиками:

- Питание линейного синхронного двигателя;
- Питание от трехфазной сети напряжением 380 В;
- Номинальный выходной ток $I_a \geq 12,8$ А;
- Пиковый выходной ток $I_p \geq 42,4$ А;
- Наличие возможности подключения sin/cos датчиков в качестве системы обратной связи по положению;
- Наличие интерфейса обмена данными по Ethernet.

Для данных потребностей подходит сервоусилитель фирмы Kollmorgen S72402-NANANA со следующими характеристиками [7]:

- Наличие возможности подключения синхронных серводвигателей, а так же линейных двигателей;
- Широкий диапазон значений входных номинальных напряжений: 1 x 110 В-10% ... 3 x 480 В+10%;
- Наличие встроенных интерфейсов связи EtherCAT, CANopen и RS-232;
- Встроенная поддержка регулирования положения;

Номинальные данные сервоусилителя приведены в рисунке 5.

Электрические характеристики	DIM	S70102	S70302	S70602	S71202	S7120S	S72402	S7240S
Номинальное напряжение питающей сети (заземленная сеть) фаза-фаза	V~	3 x 208 V _{-10%} ... 3 x 480 V ^{+10%} ; 50/60 Гц						
Номинальная потребляемая мощность	кВА	1,1	2,2	4,5	9	9	18	18
Допустимая частота включения	1/ч	30						
Вспомогательное напряжение	—	⇨ стр. 28						
Макс. напряжение звена постоянного тока	V=	900						
Номинальный выходной ток (эффективное значение, ± 3%)								
при 3x208 В	A	2,5	5	6	12	12	24	24
при 3x230 В	A	2	4	6	12	12	24	24
при 3x400 В	A	1,5	3	6	12	12	24	24
при 3x480 В	A	1,5	3	6	12	12	24	24
Пиковый выходной ток (на период до 2 с, ± 3%)	A	4,5	9	18	24	30	48	72
Пиковый выходной ток (на период до 5 с, ± 3%)	A	3	6	12	24	24	48	48
Тактовая частота выходного каскада	кГц	8						
Скорость роста напряжения dU/dt (измерение при разомкнутых клеммах, ⇨ стр. 71)								
при 3x208 В	кВ/мкс	3,0						
при 3x230 В	кВ/мкс	3,3						
при 3x400 В	кВ/мкс	5,7						
при 3x480 В	кВ/мкс	6,9						
Технические данные тормозной схемы	—	⇨ стр. 33						
Порог отключения при повышенном напряжении	V пост. тока	⇨ стр. 33						
Индуктивность двигателя, мин.								
при 3x208 В	мГн	7,7	3,9	1,9	1,2	1,2	0,7	0,7
при 3x230 В	мГн	8,5	4,3	2,1	1,3	1,3	0,8	0,8
при 3x400 В	мГн	14,8	7,4	3,7	2,2	2,2	1,4	1,4
при 3x480 В	мГн	17,8	8,9	4,4	2,7	2,7	1,7	1,7
Индуктивность двигателя, макс.	мГн	Проконсультируйтесь со специалистами нашего отдела автоматизации						
Коэффициент формы выходного тока (при номинальных данных и индуктивности минимальной нагрузки)	—	1,01						
Полоса пропускания регулятора тока	кГц	> 1,2 (до 5)						

Рисунок 5 – Электрические характеристики сервоусилителя S72402

Внешний вид сервоусилителей фирмы Kollmorgen серии S700 представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид сервоусилителей

Как видно из номинальных данных сервоусилителя, он имеет номинальный выходной ток $I_a = 24$ А, пиковый выходной ток $I_p = 48$ А, что удовлетворяет нашим требованиям по электропитанию двигателей, следовательно, выбор верен.

2.2. Выбор контроллера движения

Сервоконтроллер должен удовлетворять следующим требованиям:

- наличие возможности подключения минимум 3 осей движения;
- наличие интерфейса обмена данными по Ethernet;
- P-контроллер движения;

Выбираем контроллер движения той же фирмы, что и сервоусилители. Под эти цели подходит сервоконтроллер Kollmorgen PCMM [8]. Его внешний вид представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид контроллера движения фирмы Kollmorgen

Программируемый логический контроллер имеет следующие преимущества:

- Встроенная утилита Kollmorgen Automation Suite™ обеспечивает полностью интегрированное программирование, тестирование, настройку и ввод в эксплуатацию;
- Наличие интерфейса Ethernet для связи с ПК;
- Утилита встроенного веб-сервера упрощает обслуживание оборудования;
- Наличие возможности контроля 20 или более осей движения (в зависимости от сложности заданий движения).
- EtherCAT - многоосевой мастер и Р-контроллер движения;
- Полный программный ПЛК (IEC61131-3) для управления машиной, с поддержкой 5 языков программирования;
- Выбор PLCopen для движения или Pipe Network™ для программирования управления движением;
- Энергонезависимая память 32 КБ хранит машинные данные, чтобы исключить потери при перезапуске после сбоя питания;
- Слот для SD-карты упрощает резервное копирование и ввод в эксплуатацию без ПК;
- Бортовой ввод / вывод включает 6 цифровых входов, 2 цифровых выхода. Дополнительные системные входы / выходы могут быть добавлены с помощью серии АКТ удаленного ввода / вывода;
- Обеспечивает совместимость по принципу «включай и работай» (plug-and-play) со всеми сервоприводами и серводвигателями Kollmorgen;
- Обеспечивает доступ ко всем преимуществам широкого спектра платформы Kollmorgen, включая АКМ®, CDDR™ и другие технологии с прямым приводом.

Данный контроллер удовлетворяет всем заданным требованиям технического задания.

2.3. Выбор датчиков положения

Датчики положения выбираются из условия совместимости с сервоусилителем S72406, а также поддержки диапазона скоростей и ускорений, указанных в техническом задании.

Под эти цели подходят датчики положения фирмы Renishaw серии LM10 [9]. Внешний вид считывающей головки и магнитной ленты представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид датчика положения RLS LM10

Преимущества датчиков обратной связи по положению этого типа заключаются в следующем:

- Данный датчик совместим с сервоусилителем Kollmorgen S72406, поскольку имеет 2 канала V_1 и V_2 дифференцированных синусоидальных сигналов, сдвинутых по фазе на 90° , следовательно, поддержка интерфейса sin/cos без канала данных;
- Максимальная допустимая скорость для обеспечения чтения данных с магнитной полосы до 80 м/с;
- Точность линейного позиционирования до ± 20 нм;
- Простота установки и регулирования датчика положения относительно магнитной ленты;

Исходя из вышесказанного, выбранный датчик полностью удовлетворяет требованиям технического задания и совместим со выбранным ранее оборудованием.

2.4. Выбор моторного дросселя

Необходимость использования моторного дросселя обуславливается тем, что устанавливая их после сервоусилителя, они повышают качество выходного напряжения, превращая ШИМ выхода сервоусилителя в подобие синусоиды с малыми флуктуациями [10], снижая потери в кабеле двигателя, а так же потери на вихревые токи, позволяя увеличивать длину кабеля мотора. [11]

Выбор моторного дросселя должен осуществляться из требований номинального тока двигателя, исходя из этого, номинальный выходной ток моторного дросселя быть $I_a \geq 12,8$ А.

Так же производитель приводит в своей документации список рекомендуемых к применению моторных дросселей, указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Список рекомендуемых моторных дросселей

Сервоусилитель	Дроссель	Условие
S300	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
S400	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
S601...620	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
S701...724	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
S748/772	Не требуется	
AKD-P003x...AKD-P006	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
AKD-P012x	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м
AKD-P024x	3YL-24, 3YLN-xx	Кабель двигателя ≥ 25 м

Технические характеристики рекомендуемого к использованию моторного дросселя приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики моторного дросселя 3YL-24

Характеристика	Обозначение	Единицы измерения	3YL-24
Номинальный ток	I_{ORMS}	А	3x24
Частота	f_{MAX}	кГц	8.3

Продолжение таблицы 4

Индуктивность	L	нГн	120
Сопротивление	R	МОм	2.6
Вес	G	кг	1.4

Выбранный моторный дроссель полностью удовлетворяет техническому заданию.

2.5 Выбор автоматических выключателей

Вводной автомат выбирается из следующих условий: [13]

$$I_{H.PACЦ} \geq I_{дл} = I_H;$$

$I_{H.PACЦ}$ - номинальный ток расцепителя.

Поскольку в максимальных режимах работы 3 двигателя будут потреблять максимальный ток сервоусилителей составляющий $I_p = 48A$, в данном случае требуется выбрать автоматический выключатель с $I_{H.PACЦ} \geq 3 \cdot I_p = 144A$.

Под эти требования подходит выключатель автоматический ВА88-33 ЗР 160А 35кА ИЕК, с техническими характеристиками, указанными в таблице 5.

Таблица 5 - Технические характеристики ВА88-33 160А ЗР

Технические характеристики	
Номинальная отключающая способность I_{cu} при 400 В 50 Гц	35 кА
Тип подключения силовой электрической цепи	Винтовое соединение
Количество полюсов	3
Тип элемента управления	Тумблер
Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение	8 кВ
Номинальный ток	160 А
Тип расцепителя	Тепловой, электромагнитный

Продолжение таблицы 5

Номинальная рабочая наибольшая отключающая способность I_{cs} :	17,5 кА
Климатическое исполнение:	УХЛЗ
Номинальное рабочее напряжение:	400 В
Частота сети:	50 Гц

Так же для дополнительной безопасности каждого сервоусилителя, подберем автоматические выключатели, основываясь также на максимальных режимах использования оборудования, т.е. при максимальном потребляемом токе сервоусилителя $I_p = 48\text{А}$.

Технические характеристики подходящего выключателя автоматического ВА47-29 3Р 63А 4,5кА С IEK представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики ВА47-29 3Р 63А IEK

Технические характеристики	
Количество полюсов	3
Номинальный ток	63 А
Характеристика срабатывания - кривая тока	С
Номинальное рабочее напряжение	400 В
Отключающая способность по EN 60898	4,5 кА
Макс сечение входящего кабеля	25 мм ²
Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение	4 кВ
Класс токоограничения	3
Частота	50 Гц

2.6 Выбор блока питания

Для обеспечения питания вспомогательного напряжения сервоусилителей, а также питания контроллера движения необходимо подобрать блока питания номинальным напряжением 24 В [14].

Основные потребители вспомогательно напряжения – сервоусилители, как видно из технического описания в таблице 7, потребление тока составляет $I_1 = 1\text{ A}$, а также контроллер движения РСММ потребляет ток величиной $I_2 = 1.25\text{ A}$ (таблица 8).

Таблица 7 – Электрические характеристики сервоусилителя S700

Интерфейс	Электрические характеристики
Аналоговые входы 1/2 ±10 В Синфазное напряжение, макс	±10 В
	±10 В
Цифровые управляющие входы	согласно EN 61131-2 тип 1, макс. 30 В пост. тока, 15 мА
Цифровые управляющие выходы	согласно EN 61131-2 тип 1, макс. 30 В пост. тока, 100 мА
Выход ВТВ/РТО, релейные контакты	макс. 30 В пост. Тока / 42 В пер. тока
	500 мА
Вход/выход 24 В для цифровых выходов	20 В ... 30 В
Вспомогательное напряжение, с развязкой потенциалов	24 В (-0% + 15%)
Потребление тока без тормоза / с тормозом	1 А / 3 А
Выходной ток тормоза, мин./макс.	0,15 А / 2 А

Таблица 8 – Электрические характеристики РСММ

Электрическая характеристика	Единица измерения	РСММ
Напряжение питания	В	24 V ± 10%
Входной ток	А	1.25
Входная мощность	Вт	30
Разрешенная частота включений/выключений	1/ч	30

Исходя из вышесказанного, необходим блок питания 24 В с номинальным ВЫХОДНЫМ ТОКОМ

$$I_{\text{вых}} \geq 3 \cdot I_1 + I_2 = 3 \cdot 1 + 1.25 = 4,25 \text{ A}$$

Выбираем блок питания AC/DC NES-150-24 с техническими характеристиками, указанными в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики блока питания NES-150-24

Технические характеристики	
Входное напряжение	AC 90...264 В
Входное напряжение	DC 254...373 В
Выходная мощность	150 Вт
Выходное напряжение	24 В
Выходной ток	До 6.5 А
Тип стабилизации	По напряжению
Защита	От короткого замыкания, перегрузки, перенапряжения
КПД	86%

2.7 Выбор твердотельных реле

Выбор твердотельных должен осуществляться из требования максимального тока двигателя, исходя из этого, максимальный ток нагрузки должен быть $I_a \geq 42,4 \text{ A}$. [15]

Технические характеристики твердотельного реле ближайшего большего, который удовлетворяет условию по максимальному току нагрузки, представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики ННГ1-3/032F-38-60А

Технические параметры	
Коммутируемое напряжение	переменное
Управление	постоянный ток
Управляющее напряжение, В	3...32

Продолжение таблицы 10

Коммутируемое переменное напряжение, В	40...440
Максимальный ток нагрузки, А	60
Управляющее напряжение мин., В	3
Управляющее напряжение макс., В	32

2.8 Выбор тормозного резистора

Произведем расчет тормозного резистора, необходимого для рассеивания тепла, выделяемого при процессах торможения. [16]

Энергия, возвращаемая при каждом замедлении, рассчитывается по следующей формуле:

$$E_{DEC} = \frac{1}{2} M_t (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot (5 - 0)^2 = 2500 \text{ Дж},$$

где:

E_{DEC} (джоулей): энергия, возвращаемая замедлением;

M_t (кг): движущаяся масса;

V_1 (м/с): скорость в начале замедления;

V_2 (м/с): скорость в конце замедления.

Рассчитываем количество энергии, рассеиваемой двигателем за счет рассеивания тепла через сопротивление обмотки двигателя, используя следующую формулу:

$$P_{MOTOR} = \frac{3}{4} R_{winding} \left(\frac{m \cdot a}{Kt} \right)^2 = \frac{3}{4} \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{4000}{95} \cdot \sqrt{2} \right)^2 = 2127,5 \text{ Вт},$$

где:

P_{MOTOR} (Вт): мощность, рассеиваемая в двигателе;

$R_{winding}$ (Ом): сопротивление линии от линии катушки двигателя;

Kt (Н/А): постоянная усилия линейного двигателя;

$$E_{MOTOR} = P_{MOTOR} \cdot T_{DECEL} = 2127,5 \cdot \frac{5}{20} = 531,9 \text{ Дж},$$

где:

E_{MOTOR} (Дж): энергия, рассеиваемая в двигателе;

T_{DECEL} (секунды): время замедления.

Рассчитаем количество энергии, которое будет возвращено в сервоусилитель после каждого замедления, используя следующую формулу:

$$E_{RETURNED} = E_{DEC} - E_{MOTOR} = 2500 - 531,9 = 1968,1 \text{ Дж},$$

где:

$E_{RETURNED}$ (Дж): энергия возвращается в усилитель;

E_{DEC} (Дж): энергия, возвращаемая замедлением;

E_{MOTOR} (Дж): энергия, рассеиваемая двигателем.

Сравниваем количество энергии, возвращаемой усилителю в каждое замедление с его поглощающей способностью. Следующая формула используется для определения энергии, которая может быть поглощается усилителем.

$$W_{CAP} = \frac{1}{2} C (V_{REGEN}^2 - (1.414 V_{MAINS})^2) = \frac{1}{2} \cdot (3880 \cdot 10^{-6}) \cdot (900^2 - (1.414 \cdot 380)^2) \\ = 1011,3 \text{ Дж}$$

W_{CAP} (Дж): энергия, которая может быть поглощена конденсаторами шины

C (Ф): емкость шины

V_{REGEN} (В): напряжение звена постоянного тока

V_{MAINS} (В): сетевое напряжение (АС), приложенное к усилителю

Для каждого замедления, где энергия торможения превышает поглощаемую мощность усилителем, используем следующую формулу для расчета энергия, которая должна рассеиваться тормозным резистором:

$$E_{REGEN} = E_{RETURNED} - E_{AMP} = 1968,1 - 1011,3 = 957,7 \text{ Дж},$$

где:

E_{REGEN} (Дж): энергия, которая должна рассеиваться в тормозном резисторе;

$E_{RETURNED}$ (Дж): энергия, поступающая обратно в усилитель от двигателя;

E_{AMP} (Дж): энергия, которую усилитель будет поглощать.

Мощность, которая должна рассеиваться тормозным резистором определяется по следующей формуле:

$$P_p = \frac{E_{REGEN}}{T_{DECEL}} = \frac{957,7}{0,25} = 3830,8 \text{ Вт},$$

где:

P_p (Вт): импульсная мощность на тормозном резисторе;

E_{REGEN} (Дж): энергия, которая должна рассеиваться в тормозном резисторе;

T_{DECEL} (с): время торможения двигателя.

Следовательно, тормозной резистор должен быть мощностью не менее 3830,8 Вт. Из стандартного ряда рекомендованным Kollmorgen, подходит под эти цели тормозной резистор BAS-4000-23 с параметрами 4000Вт, 23 Ом.

2.9. Разработка электрической схемы общей

Подобранные компоненты позволяют произвести компоновку и разработку электрической схемы подключений в соответствие технической документацией на каждый элемент. [17]

Разработанная электрическая схема проиллюстрирована на рисунке 9.

На данной схеме присутствует 3 сервоусилителя А3-А5, силовая часть которых запитана от трехфазных твердотельных реле К1-К3 линейным напряжением 380 В, коммутируемые цифровым входами ВТВ (наличие ошибок в сервоусилителе), а также подведенные через нормально-замкнутые контакты кнопки аварийного останова SB1 типа «Грибок» для возможности принудительного ручного останова оборудования при возникновении аварийной ситуации. Вспомогательное напряжение 24 В сервоусилителей (логическая часть) подведено из блока питания А1 на соответствующие контакты. Включена функция система блокировки повторного запуска (STO), которая позволяет после останова привода с помощью внутренней электронной

схемы отключить привод, на который подается питание, чтобы надежно заблокировать приводной механизм от нежелательного запуска контакты 3 разъемов Х4А.

Данные сервоусилители в свою очередь соединены с дросселями мотора А6-А8, предназначенных для повышения качества выходного напряжения и возможности удлинения линии, которые подводят питание линейным синхронным двигателям через промежуточные контактные разъемы ХР2-ХР4 соответственно. Питание датчиков положения и получение информации с них происходит через разъем Х1 типа DB15.

Автоматическими выключателями QF1-QF3 обеспечивается защита сервоусилителей А3-А5 соответственно от короткого замыкания.

Тормозные резисторы подключаются к контактам 2,3 (+RBe, +RBi) разъемов Х8 сервоусилителей через промежуточные контактные разъемы ХР5.

Данная схема удовлетворяет минимальным требованиям безопасности, а также обеспечивает необходимый функционал для работы с оборудованием.

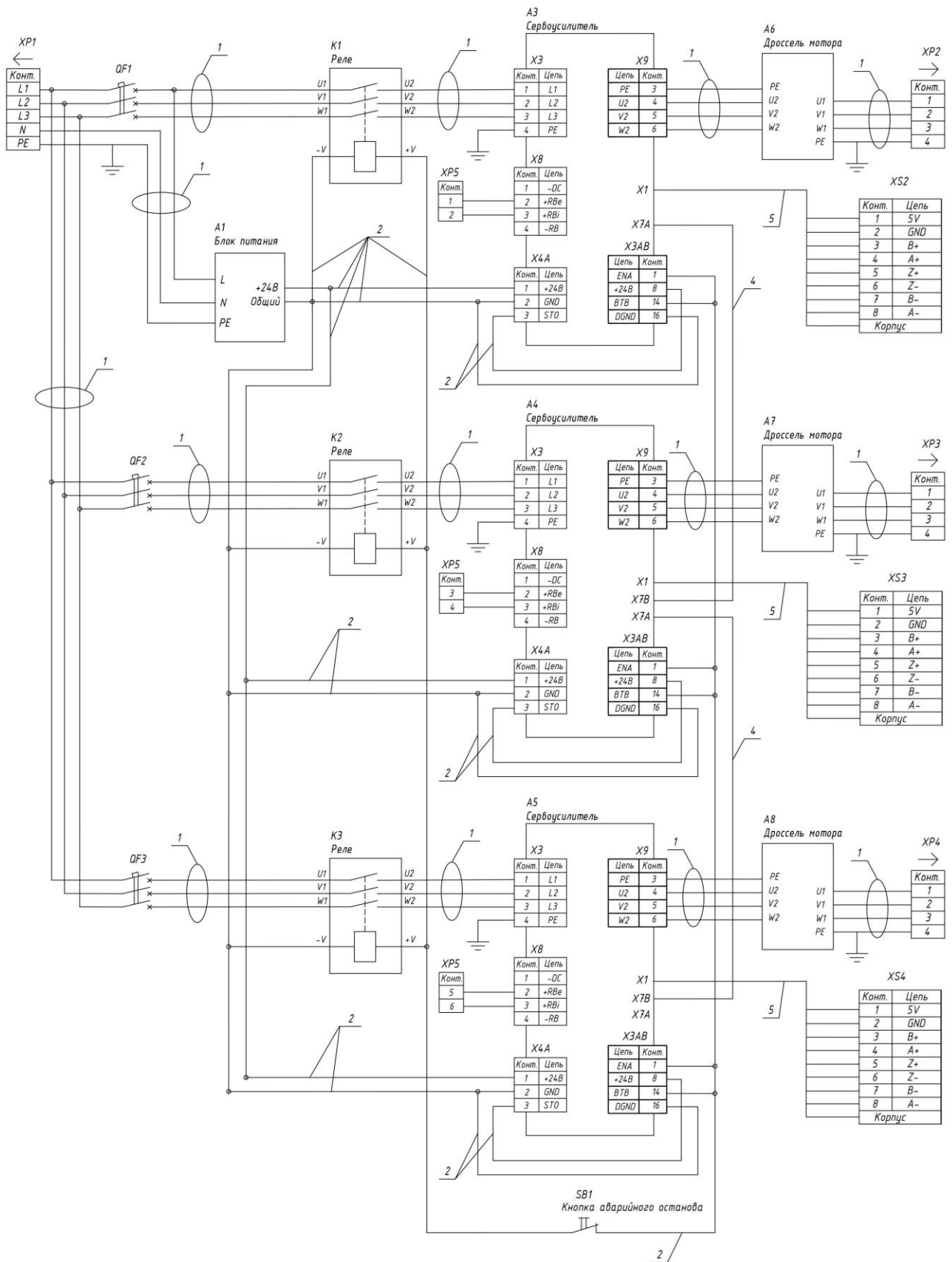


Рисунок 9 – Электрическая схема общая блока управления системой

На рисунке 10 представлена фотография, показывающая собранный по разработанной электрической схеме блок управления ДУЦ.

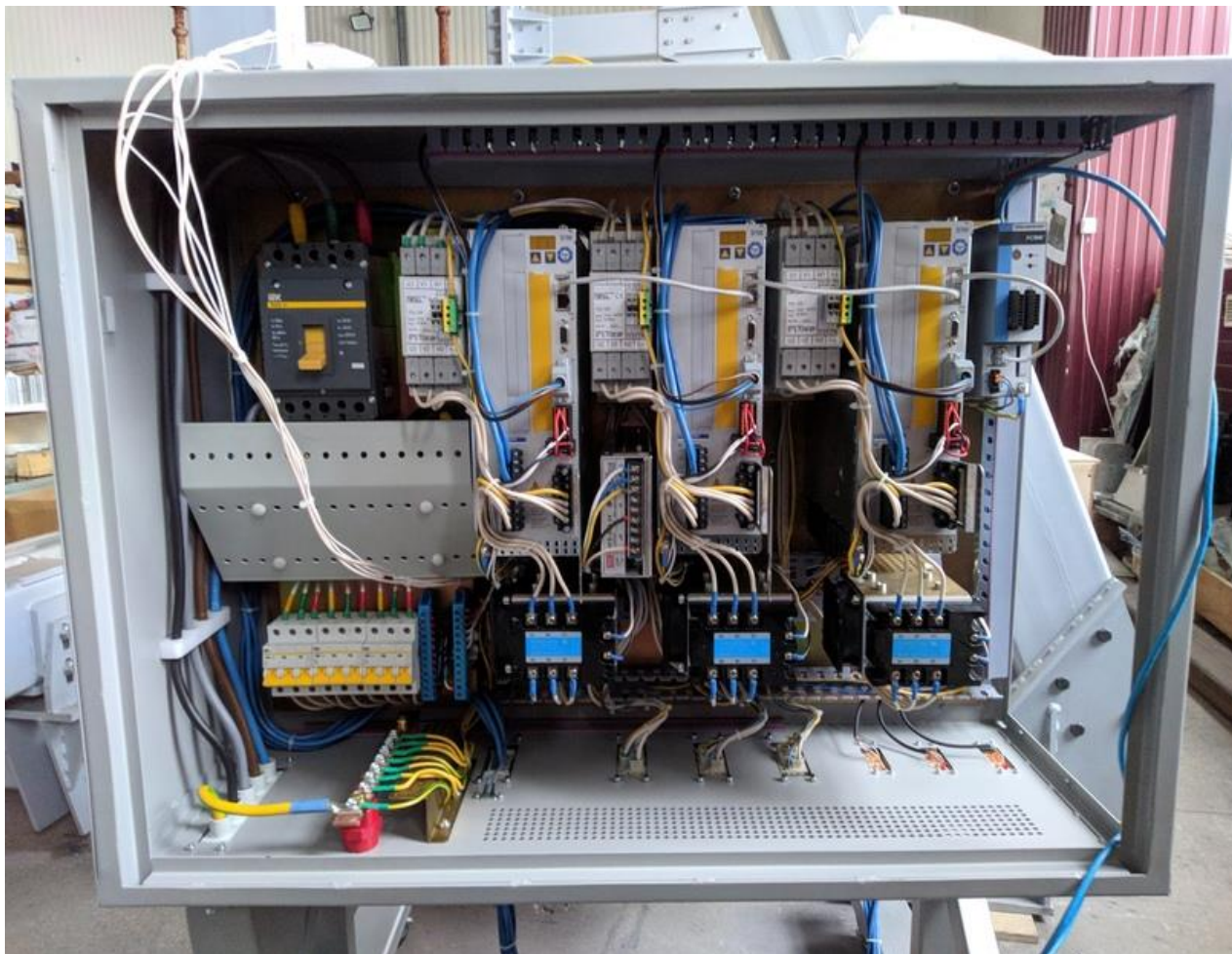


Рисунок 10 – Фотография собранного блока управления

3 Математическое моделирование линейного двигателя и настройка регуляторов сервосистемы

3.1 Математическая модель линейного синхронного двигателя

В настоящее время проявляется повышенный интерес к линейным электроприводам колебательного движения. Такие приводы позволяют получать в технологическом процессе непосредственно возвратно-поступательное движение, исключая тем самым звено преобразования вращательного движения в поступательное. В качестве электрического двигателя в таких приводах могут применяться линейные синхронные двигатели с постоянными магнитами (ЛСД-ПМ) и линейные асинхронные двигатели (ЛАД). [18]

На этапе проектирования линейного электропривода колебательного движения с учетом, как правило, сложного характера механической нагрузки, необходимо решать задачу моделирования электромеханических переходных процессов при использовании в общем случае полупроводникового преобразователя, например, инвертора с ШИМ в качестве источника электропитания. Для случая электроприводов вращательного движения при решении таких задач в последнее время все более широко используется пакет программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Однако в случае линейных электроприводов этот вопрос слабо освещен в литературе и требует специального рассмотрения. [19]

На данный момент представлено несколько подходов для решения поставленной задачи.

Один из подходов к созданию математической модели описан в научной статье А.Н.Зайцева, В.Э.Воскобойника, С.В.Комарова, А.С.Ворошилова «Разработка математической модели привода с линейным синхронным двигателем для исследования переходных режимов» [20]. Предложенный вариант математической модели линейного синхронного электропривода, позволяет учесть особенности конструкции и соотношения его параметров.

Модель позволяет исследовать электромеханические и тепловые процессы в линейном электроприводе с синхронным двигателем.

В ходе статьи получены результаты математического моделирования переходных процессов линейного вентильного двигателя при подключении обмоток статора к источнику питающего напряжения. Установлено, что с точки зрения динамического звена ВД близок по своим характеристикам к машине постоянного тока. Основной управляющий сигнал – амплитуда напряжения двигателя. Формированием управляющего сигнала во времени можно добиться постоянства движущего усилия при разгоне или торможении. Созданная модель дает возможность подробно исследовать ВД в переходных, квазиустановившихся и установившихся режимах.

Результаты показали, что специфические особенности электромагнитных и механических процессов требуют дополнительных исследований, следовательно, данная модель является адекватной, но несовершенной.

Следующий подход описан в статье А.Д. Подольцева, Р.П. Бондаря "Моделирование работы трехфазного линейного синхронного двигателя колебательного движения в пакете MATLAB/Simulink", целью которого является моделирование электромеханических переходных процессов в линейном приводе колебательного движения, выполненном на основе ЛСД-ПМ, используя стандартный пакет программ Matlab/Simulink [21]. Согласно этому подходу необходимо, на первом этапе, установить соответствие между исследуемым линейным двигателем и аналогичным ему двигателем вращательного движения и определить его электромагнитные параметры. Затем, на втором этапе, используя стандартные модели для машин вращательного движения и модели электроприводов, имеющиеся в пакете SimPowerSystems, выполнить компьютерное моделирование линейного электропривода.

Указанный подход может применяться при справедливости следующих предположений:

- 1) малые скорости движения подвижной части двигателя, когда влиянием продольного краевого эффекта можно пренебречь;
- 2) двигатель имеет короткий статор (или длинный якорь), так что при движении якоря его концевые участки не влияют на процессы в активной зоне статора;
- 3) приближенно справедливо равенство электромагнитных параметров трех фазных обмоток.

Следует отметить, что вопросы учета краевых эффектов, а также ряда других эффектов, возникающих в линейных машинах, при выполнении моделирования в пакете Matlab/Simulink являются актуальными и требуют отдельного рассмотрения.

Для исследования динамических характеристик исследуемого линейного привода на основе синхронного двигателя использовалась Simulink-модель, показанная на рис. 11. Модель содержит стандартный блок синхронной электрической машины с постоянными магнитами, который моделирует процессы в линейном двигателе. Питание двигателя осуществляется от управляемого источника однофазного напряжения, позволяющего осуществлять в процессе счета медленное изменение как частоты, так и амплитуды напряжения, что необходимо для исследования резонансных свойств привода.

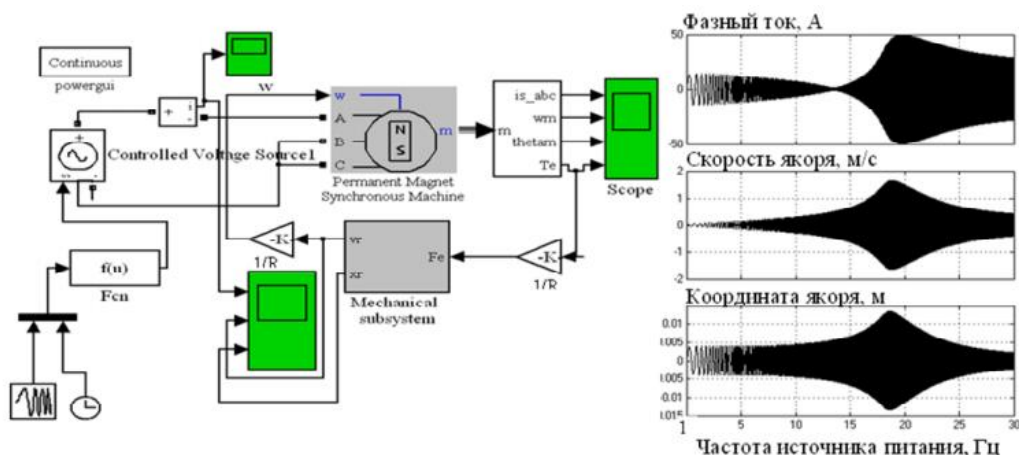


Рисунок 11 - Simulink-модель для анализа электромеханических процессов в линейном двигателе колебательного движения (а) и резонансные характеристики привода (б)

На основе решения полевой задачи были определены параметры двигателя, используемые в стандартном блоке синхронной машины пакета Simulink. Изучены резонансные свойства линейного привода при работе в колебательном режиме с малой амплитудой колебаний. Показано, что при напряжении источника питания выше критического, в приводе возникает режим хаотических колебаний якоря.

Очередной подход описан в статье "Исследование математической модели привода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах" А.Н.Зайцева, В.Э.Воскобойника, С.В.Комарова, А.С.Ворошилова [22]. В данной работе исследовалась математическая модель электропривода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах. Модель позволяет исследовать электромеханические и тепловые процессы в линейном электроприводе с учетом особенностей конструкции и значения параметров.

В предложенном варианте в модель электропривода с линейным синхронным двигателем добавлено звено силового полупроводникового преобразователя напряжения (рис. 12, выделен штриховкой).

В системе (блоки 3Sum, 4Sum) в начальный момент времени $t = 0$ подается вектор напряжения, представленный в неподвижной системе координат. Это напряжение можно получить следующим образом.

Управление значением амплитуды напряжения (с блока Um рис. 13) подается на управляемый источник напряжения (блок Con Volt Source), выход которого подключен к преобразователю (блок Un Bridge). Блок Un Bridge в своей схеме может содержать идеальные силовые ключи. Затем трехфазное напряжение, полученное в блоке Un Bridge с помощью преобразователя координат (блок Sub3x2), преобразуется в систему неподвижных координат α, β и подается на упомянутые выше блоки (блоки 3Sum, 4Sum). Блок Puls1 формирует заданную логическую последовательность импульсов для управления силовыми ключами преобразователя Un Bridge. Одновременно на Блок Puls1 подается сумма сигналов с блока Constant и сигнал U ω 1 пропорциональный фазовому углу вектора выходного напряжения, который

можно получить из модели двигателя. Учтено, что угол поворота вала двигателя нельзя представлять как $v t$ (базовая модель), так как при уменьшении скорости v и возрастании времени t возможен вариант, когда их произведение остается постоянным, т. е. фазовый угол не изменяется. В действительности скорость вращения вала не равна нулю и угол должен расти. Поэтому угол поворота вала двигателя определяется как интеграл скорости.

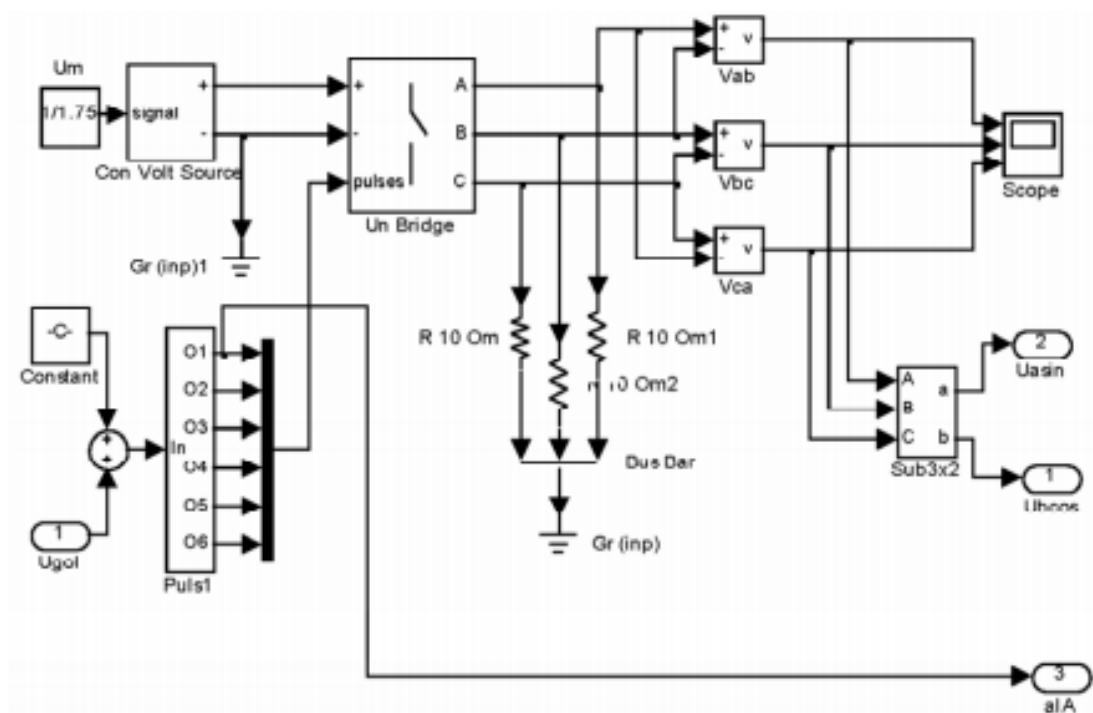


Рисунок 13 - Модель преобразователя

В модели вентильного двигателя в относительных единицах амплитуда напряжения двигателя равна единице. Если начальная фаза напряжения равна нулю, то движения не будет. Шесть переключений за период – это шаг $\pi/3$. Первое постоянное смещение, которое подается на вход U_{gol} , величиной $\pi/3$ повернет вектор напряжения в исходном состоянии на 60 эл. град. Угол поворота двигателя после этого увеличивается в положительном направлении. Блок Multimeter позволяет измерять напряжения и токи каждого силового ключа в преобразователе напряжения. Выход a/A в силовом преобразователе предусмотрен для последующих исследований единичного силового ключа.

В данной статье была рассмотрена работоспособная модель силового преобразователя вентильного двигателя, который может содержать автономный инвертор напряжения или тока. Получены результаты моделирования

переходных процессов при совместной работе преобразователя и вентильного двигателя, которые позволяют оценить качество тягового усилия и гармонического состава токов в преобразователе и в питающей сети от параметров системы и режимов движения.

Установлено, что с помощью программных методов управления преобразователем можно улучшить гармонический состав токов, снизить потери мощности, уменьшить энергозатраты на перемещение транспортного средства.

В модели предусмотрена возможность получения исходных данных для расчета температуры силовых элементов преобразователя. С помощью измерительных блоков можно получить напряжение и ток, протекающие непосредственно в каждом силовом ключе. Перемножив их, можно получить потери мощности силового ключа. Если подставить полученную мощность в тепловую модель (не рассматривается в данной статье) можно получить температуру отдельно взятого силового ключа преобразователя.

Результаты показывают специфические особенности электромагнитных и механических процессов, которые требуют дополнительных исследований с целью оптимизации параметров и режимов работы электропривода. [23]

3.2 Обзор утилиты для работы с сервоусилителями

Встроенное программное обеспечение DriveGUI предназначено для настройки параметров и настройки сервоусилителей. Внешний вид интерфейса программы показан на рисунке 14 [24].



Рисунок 14 – Интерфейс программы DriveGUI

Для начала настройки ПК должен быть подключен к сервоусилителю с помощью кабеля связи, в данном случае по интерфейсу обмена RS-232. Программа установки инициирует связь между ПК и сервоусилителем.

Данная программа позволяет в реальном времени изменять параметры и мгновенно наблюдать за воздействием на привод, так как к сервоусилителю постоянно подключено соединение. В то же время важные фактические значения считываются с усилителя и отображаются на мониторе ПК (функции осциллографа).

Настройка привода начинается с выбора двигателя из стандартного ряда, или вводом всех паспортных данных в разделе «Motor» (рисунок 15).

The image shows a 'Set Up Motor' dialog box with the following fields and values:

- Motor Type: 2: PM Linear Motor
- Linear Motor Type: Ironcore
- Motor Name: (empty)
- Cont. current: (empty) Amps
- Peak current: (empty) Amps
- Maximum Speed: (empty) mm/s
- Motor Poles: 2
- Pole-Pair Pitch: (empty) μm
- Motor force constant: (empty) N/Amp
- L, line-to-line: (empty) mH
- Stator Winding Resistance: (empty) Ohms
- Motor inertia: (empty) kg
- Brake: without
- Disable delay (brake): 100 ms
- Enable delay (brake): 20 ms
- Thermistor Switch-off Threshold: (empty) Ohms
- Feedback Type: 7 Sine Enc 5V W&S - connector X1
- Max. allowed line voltage: 400 V

Buttons: Cancel, Done, Help

Рисунок 15 – Инициализация двигателя

Следующим пунктом следует выставить тип обратной связи в разделе «Feedback» (рисунок 16) и параметр «Encoder Lines», который устанавливает разрешение (количество линий) входного канала синусоидального датчика. В случае роторных двигателей это число линий на оборот, в случае линейных двигателей это количество линий на шаг полюса.

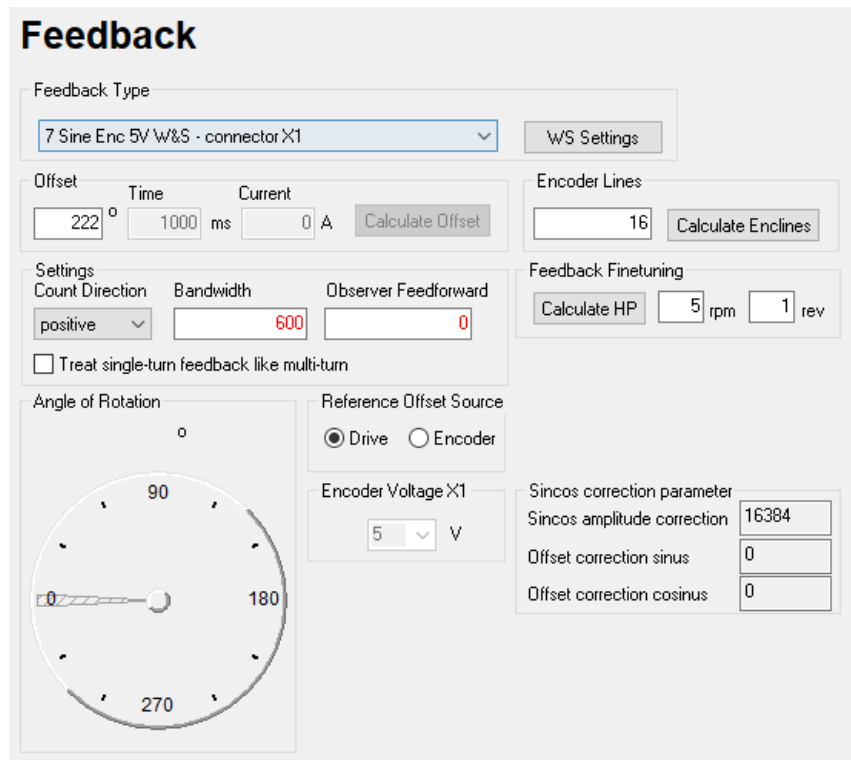


Рисунок 16– Настройка обратной связи в сервоусилителе

После этого следует попробовать запустить программу автонастройки привода в разделе «Auto-Tuning» (рисунок 17).

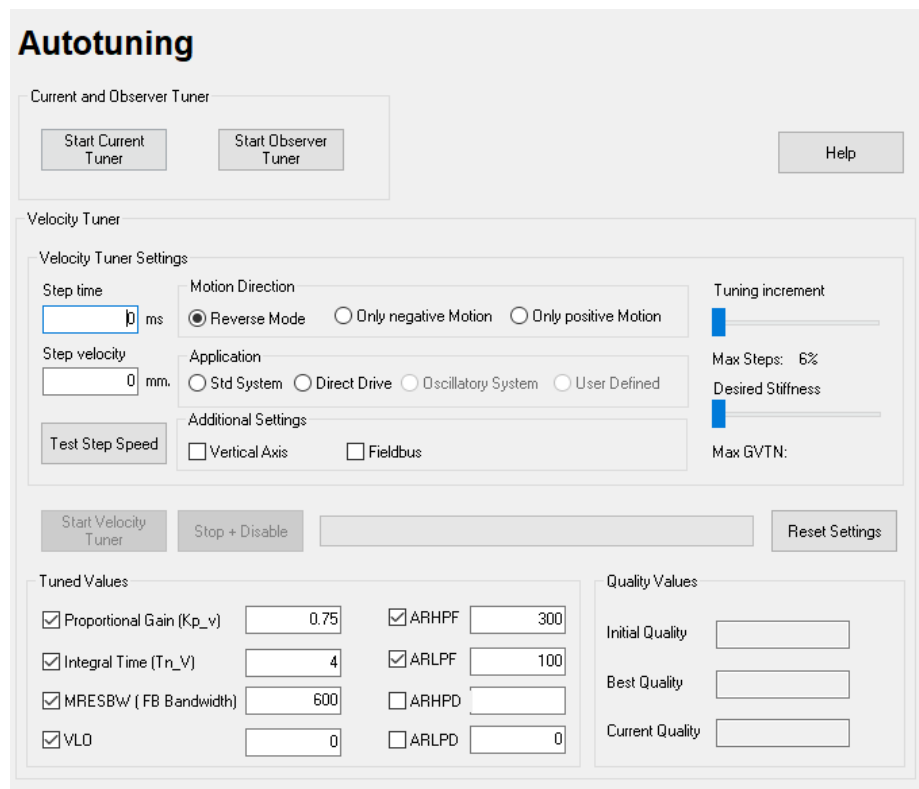


Рисунок 17 – Раздел автонастройки регуляторов сервоусилителя

Функции настройки корректируют значения производителя по умолчанию в соответствии с условиями нагрузки, чтобы минимизировать количество ошибок отслеживания. В дальнейшем потребуется оптимизировать контуры управления для высокодинамичных или высокоточных приложений вручную.

Автонастройка может быть запущена несколько раз, потому что ее результаты суммируются и оптимизируются.

Функция автонастройки настраивает контур тока и контур скорости.

Раздел контура тока показан на рисунке 18.

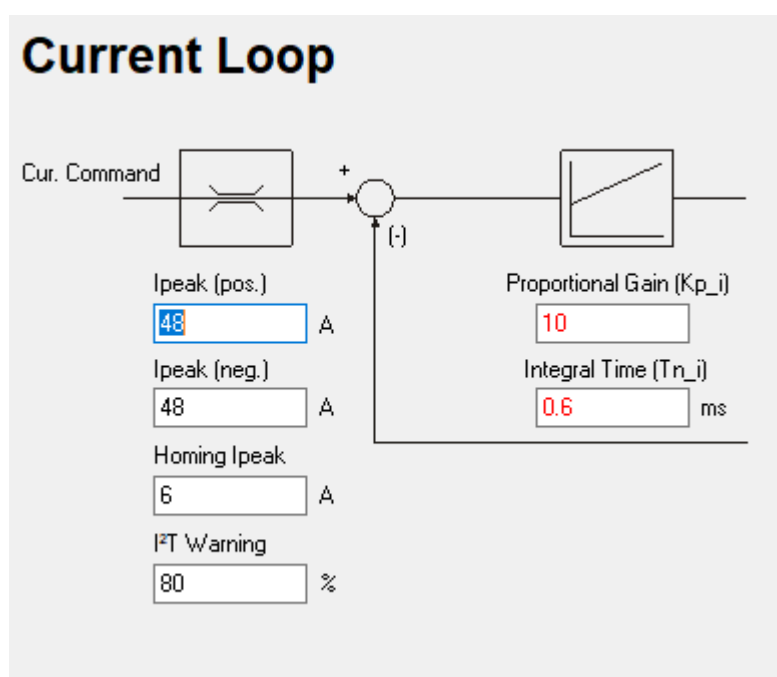


Рисунок 18 – Раздел настройки контура тока

Контур тока состоит из переменных Ipeak (pos.), Ipeak (neg.), Homing Ipeak, I²t Warning. Это токовые ограничения сервоусилителя, не позволяющие ему выдавать двигателям токи выше, чем указаны в этом разделе.

Данный контур тока содержит ПИ-регулятор:

- П-составляющая (Proportional Gain (Kp_i)) - пропорциональный коэффициент усиления контура управления током и имеет размерность В/А.
- И-составляющая (Integral Time (Tn_i)) - время интегрального действия (постоянная времени интегрирования) контура управления током.

Раздел контура скорости показан на рисунке 19.

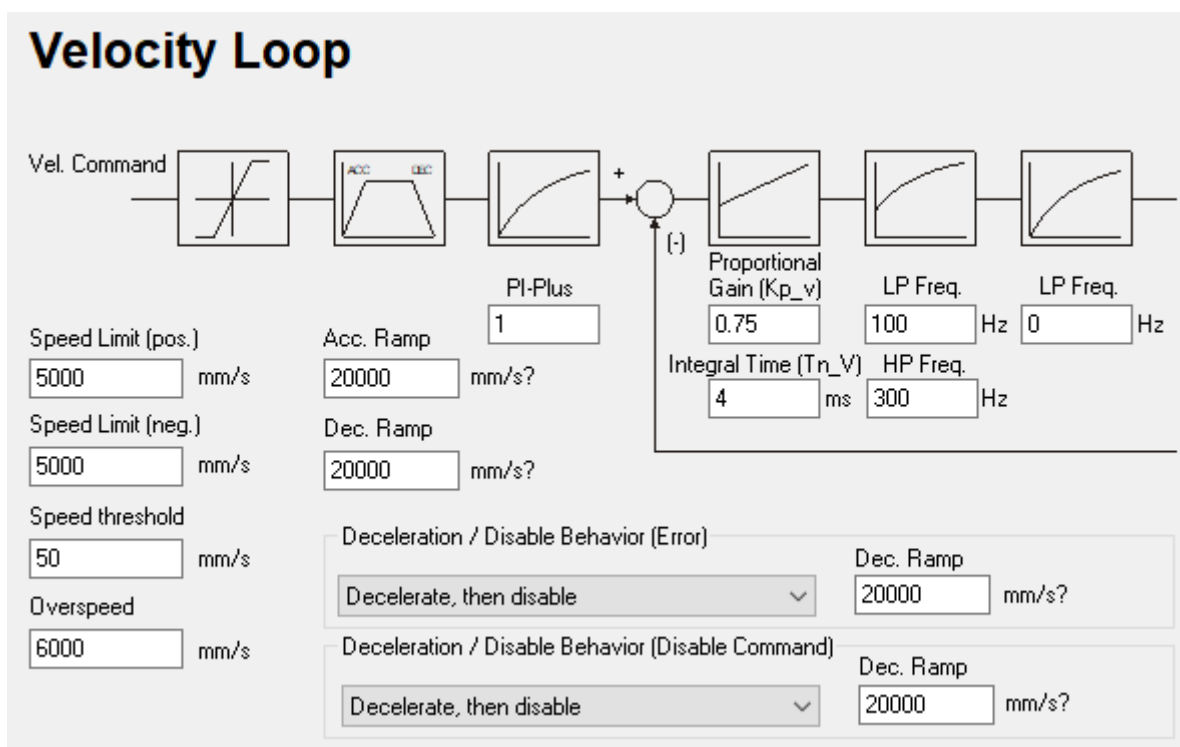


Рисунок 19- Раздел контура скорости

Контур скорости так же состоит из переменных отвечающих за ограничение скорости, ускорения, а также ускорение замедления при аварийном останове.

Контур скорости так же, как и контур тока имеет ПИ-регулятор:

- П-составляющая (Proportional Gain (K_{p_v})) – пропорциональный коэффициент усиления контура управления скоростью.
- И-составляющая (Integral Time (T_{n_v})) – время интегрального действия (интегральная постоянная времени) контура управления током. Малогабаритные двигатели позволяют сократить время интеграции. Крупногабаритные двигатели или большие моменты инерции в нагрузке обычно требуют времени интеграции 20 мс или более. Если это значение слишком низкое, привод работает с резкими или чрезмерными выбросами с высокой инерционной нагрузкой. Если значение слишком велико, привод слишком «мягкий».

Помимо этого имеются следующие переменные:

- LP Freq. – фильтр низких частот скоростного контура.

– LP Freq. 2 - это частота среза дополнительного фильтра нижних частот 1-го порядка для контура скорости.

Фильтры нижних частот используются для подавления сигналов более высоких частот (например, резонансов и шума). Применение фильтра низких частот к контуру скорости приводит к нежелательному запаздыванию фазы выше частоты среза фильтра, помимо требуемого затухания сигнала. Это приводит к ухудшению запаса по фазе. Таким образом, полоса пропускания контура скорости всегда $< 0,5$ кратна частоте отсечки нижних частот.

– HP Freq. - частота верхних частот фильтра скорости.

Раздел контура позиции демонстрируется на рисунке 20.

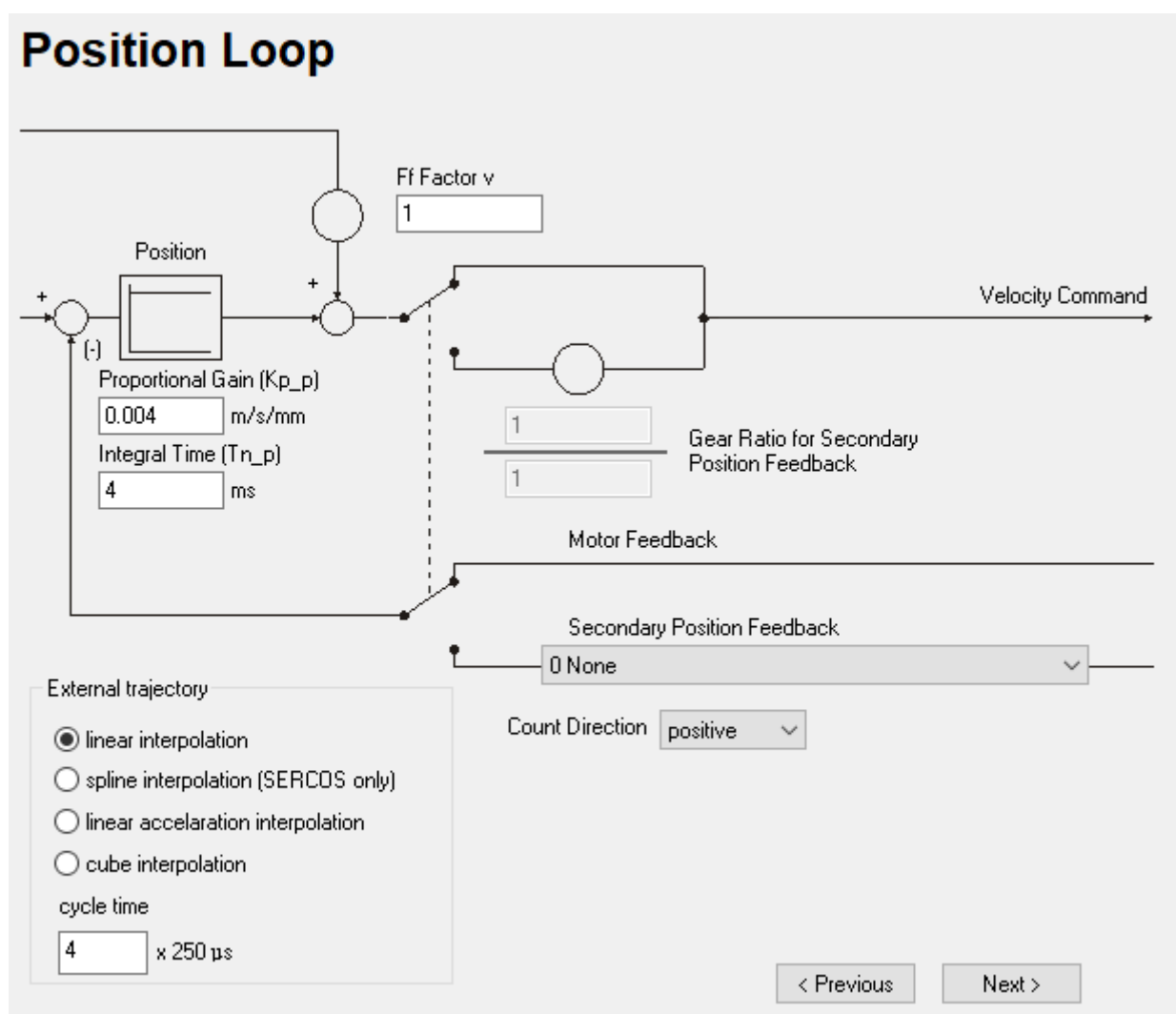


Рисунок 20 – Раздел контура позиции

Контур позиции так же имеет пропорционально-интегральный регулятор:

– П-составляющая (Proportional Gain (K_p)) - переменная является пропорциональным коэффициентом усилением контура управления положением. Если это значение установлено слишком низким, возможна задержка исполнения задания позиционирования или время занятия позиции становится слишком великим, а привод «мягкий». Если этот параметр установлен слишком высоко, привод начинает колебаться.

– И-составляющая (Integral Time (T_i)) - определяет интегральное усиление контура управления положением.

3.3 Процесс настройки регуляторов сервоусилителей

Произведем оптимизацию контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией внутренней обратной связи по ЭДС двигателя. Вследствие неявнополюсности машины, индуктивности по продольной и поперечной осям одинаковы $L_d = L_q$. Контуров токов I_{1d} и I_{1q} идентичные.

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

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

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

$$T_{шим} = \frac{1}{f_{шим}} = \frac{1}{16000} = 0,0000625 \text{ с};$$

$$T_{инв} = \frac{T_{шим}}{4} = \frac{0,0000625}{4} = 1,5625 \cdot 10^{-5} \text{ с} - \text{ постоянная времени инвертора};$$

$$T_{\vartheta} = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,016}{0,8} = 0,02 \text{ с} - \text{ электромагнитная постоянная времени якорной}$$

цепи.

Малая постоянная времени в цепи обратной связи по току

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

$$= \frac{1}{10^{\left| \lg\left(\frac{16000}{2\pi \cdot 0,5}\right) \right|}} = 0,000196 \text{ с.}$$

Эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$T_{\mu\tau\sigma} = 2T_{\text{ИНВ}} + T_{\mu\tau\sigma} = 2 \cdot 1,5625 \cdot 10^{-5} + 0,000196 = 0,000227 \text{ с.}$$

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

$$T_{\text{РТ}} = T_{\sigma} = 0,02 \text{ с}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{РТ}} = \frac{T_{\sigma} \cdot R_s}{k_{\text{от}} \cdot k_{\text{ИНВ}} \cdot 2T_{\mu\tau\sigma}} = \frac{\frac{L_s}{R_s} \cdot R_s}{2 \cdot \left(2 \cdot \frac{T_{\text{ШИМ}}}{4} + T_{\mu\tau\sigma} \right)} = \frac{L_s}{T_{\text{ШИМ}} + 2 \cdot T_{\mu\tau\sigma}} =$$

$$= \frac{0,016}{0,0000625 + 2 \cdot 0,000196} = 35$$

Для оптимизации контура скорости воспользуемся следующими формулами.

Малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\mu\sigma} = 8T_{\mu\tau\sigma} = 8 \cdot 0,000227 = 0,001816 \text{ с}$$

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W(p)_{\text{РС}} = k_{\text{РС}} \cdot \frac{T_{\text{РС}} p + 1}{T_{\text{РС}} \cdot p}$$

Постоянная времени регулятора скорости

$$T_{\text{РС}} = 26T_{\mu\tau\sigma} = 26 \left(\frac{T_{\text{ШИМ}}}{2} + 2 \cdot T_{\mu\tau\sigma} \right) = 26 \cdot \left(\frac{0,0000625}{2} + 2 \cdot 0,000196 \right) = 0,011 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора скорости

$$\begin{aligned}k_{pc} &= \frac{26 \cdot J}{512 \cdot T_{\text{мсэ}} \cdot 1,5 \cdot z_p \cdot \Psi_f} = \frac{26 \cdot J}{512(2 \cdot T_{\text{инв}} + T_{\text{мто}}) \cdot 1,5 \cdot z_p \cdot \Psi_f} = \\&= \frac{26 \cdot m}{512 \left(2 \cdot \frac{T_{\text{ШИМ}}}{4} + T_{\text{мто}} \right) \cdot 1,5 \cdot K_u} = \\&= \frac{26 \cdot 13,6}{512 \left(2 \cdot \frac{0,0000625}{4} + 0,000196 \right) \cdot 1,5 \cdot 95} = 21,3\end{aligned}$$

где, учитывая:

$z_p \Psi_f = K_u$ - константа усилия двигателя, принимаемая в линейных двигателях.

$J=m$ – масса якоря линейного двигателя.

Но даже учитывая вышеприведенный опыт, двигатели со специальными электрическими или физическими характеристиками нуждаются в специальной настройке, особенно с параметрами, которые обычно не используются в разных типах сервоусилителей различных производителей.

Производитель данных сервоусилителей и двигателей приводит особую методику обработки этих параметров, поскольку невозможно сделать общепринятый расчет для значений параметров, так как двигатели их применение могут сильно различаться. [28]

Настройка регулятора контура тока заключается в том, что необходимо увеличивать параметр пропорционального коэффициента усиления с шагом 0,5, начиная с 0,5, с включенным усилителем и поданным питанием на двигатель, пока двигатель не начнет свистеть. Текущее значение следует уменьшить на 20%. Пиковый ток при этом должен быть ограничен низким значением, чтобы снизить риск повреждения оборудования. Это значение может быть увеличено шаг за шагом в зависимости от процесса настройки. Значение пикового тока должно быть выставлено настолько высоким, чтобы двигатель мог преодолевать трение и текущую нагрузку.

Параметр интегральной постоянной времени контура тока при этом следует оставлять по умолчанию равным 0,6 мс.

Настройка контуров скорости и положения будет сосредоточена на настройке во временной области. Это означает, следует наблюдать за реакцией скорости или положения в зависимости от времени как на критерии, которые используются, чтобы решить, насколько качественно оптимизированы данные контуры.

Процедура настройки контура скорости:

- Устанавливаем K_{p_v} на 0.
- Устанавливаем T_{n_v} на 0.
- Даем задание приводу на движение, подобное скоростям движения, которые будут использоваться в реальном применении. Не следует устанавливать движение на скорость, превышающую $\frac{1}{2}$ максимальной скорости двигателя, чтобы обеспечить безопасное превышение (аварийный останов) во время настройки. Устанавливаем ускорение на соответствующее значение для нашего применения.

- Включаем привод и запускаем движение. При обнуленном контуре скорости движения произойти не должно.

- Продолжаем увеличивать пропорциональный коэффициент усиления контура скорости в 2 раза, начиная с 1, пока не выполнится хотя бы одно из следующих действий:

1. Слышен неприятный шум из системы (гудение, жужжание, вибрация);
2. Наблюдение за превышением скорости. При использовании только K_{p_v} не должно быть превышения скорости.
3. Когда достигнется одно из указанных выше условий, уменьшаем параметр до значения, при котором не было никаких нежелательных шумов или превышения (обычно это уменьшение на 15%).

– Регулировка Tn_v . Увеличиваем Tn_v в 1,5 раза, пока не выполнится хотя бы одно из следующих условий:

1. Слышен или замечен нежелательный шум или дрожь в системе
2. Появление перерегулирования. Пример перерегулирования представлен на рисунке 21. Командное задание составляет 1000 мм/с (местоположение 1), где перерегулирование достигает максимума при 1150 мм/с (местоположение 2).

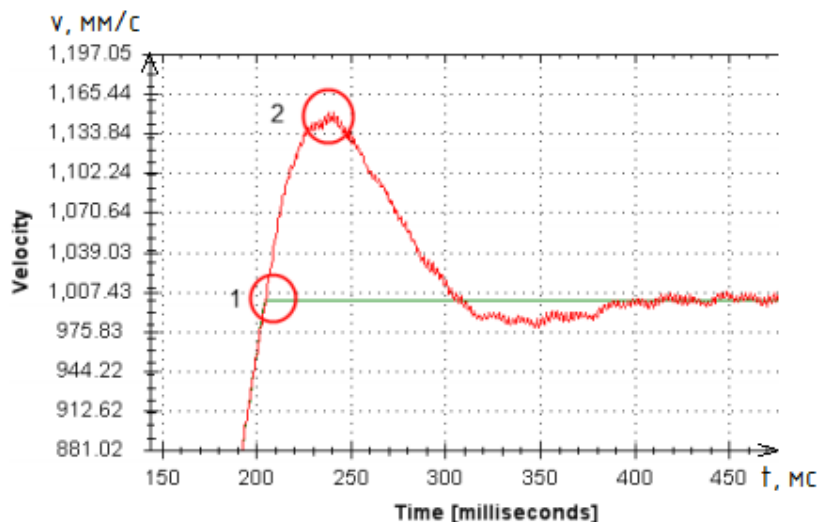


Рисунок 21 – Осциллограмма примера перерегулирования

3. Появление колебаний в системе. Пример колебаний в системе показан на рисунке 22. Каждый выброс показан красным маркером.

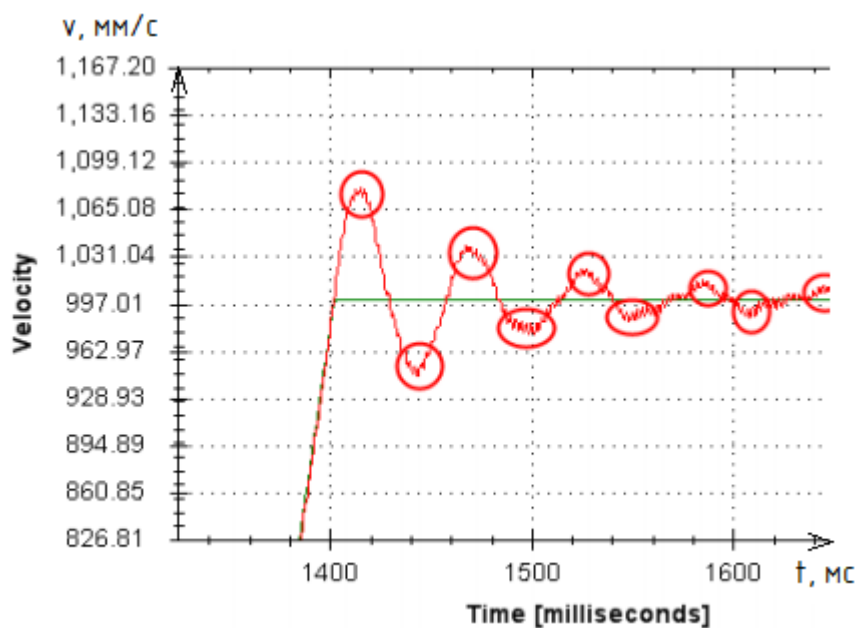


Рисунок 22 – Осциллограмма примера колебаний в системе

– Когда достигнется одного из указанных выше пределов, уменьшаем Tn_v до значения, при котором не было никаких нежелательных шумов или перерегулирования

Контур положения основан на правильно настроенном контуре скорости, чтобы обеспечить точный контроль над положением, следует настроить П-составляющую и И-составляющую в контуре скорости и использовать только П-составляющую в контуре положения.

Процедура настройки контура положения:

– Увеличиваем Kp_r до тех пор, пока не выполнится хотя бы одно из условий:

1. Фиксируется перерегулирование более 10%;
2. Фиксируется более 3 колебаний в системе.
3. Слышны нежелательные шумы системы.

– Когда достигнется одного из указанных выше пределов, уменьшаем Kp_r до значения, при котором не было никаких нежелательных шумов или перерегулирований.

На этом базовая настройка регуляторов сервоусилителя считается завершенной и оптимальной для работы приводов.

4 Разработка программного обеспечения для осуществления многокоординатного движения

PCMM выполняет роль мощного ПЛК, контроллера движения и EtherCAT мастера.

PCMM может контролировать движение до 128 осей и обеспечивать синхронизацию, а встроенный веб-сервер упрощает обслуживание и мониторинг. [29]

Энергонезависимая память 32 КБ хранит данные прошивки, чтобы исключить потери при перезапуске после сбоя питания, а слот для SD-карты упрощает резервное копирование и ввод в эксплуатацию без ПК.

Порты ввода / вывода включают 6 цифровых входов, 2 цифровых выхода которые используются для подключения концевых выключателей.

В комплект поставки PCMM входит среда программирования Kollmorgen Automation Suite, которая обеспечивает возможность программирования, тестирования, настройку и ввод в эксплуатацию.

Программирование ПЛК может осуществляться на всех пяти языках программирования стандарта IEC 61131-3.

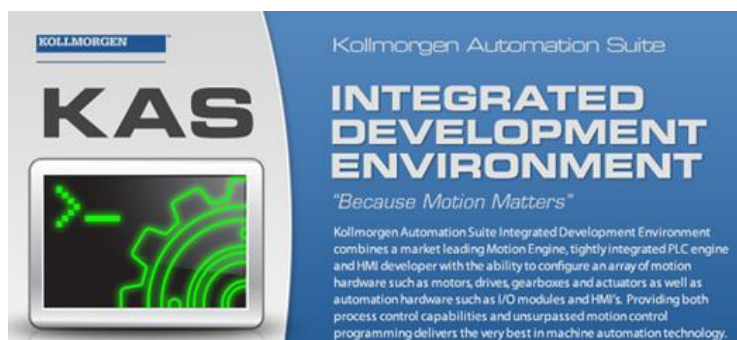


Рисунок 23 – Оболочка KAS IDE

Подпрограмма Kollmorgen Visualization Builder используется для программирования панелей человеко-машинного интерфейса.



Рисунок 24 – Оболочка KAS Visualization Builder

Подпрограмма Kollmorgen Simulator позволяет смоделировать и отладить управление движением и синхронизацию двигателей без их физического наличия.

Удаленный доступ к переменным ПЛК из ПО верхнего уровня обеспечивается с использованием HTTP.

Переменные ПЛК на РСММ могут быть прочитаны или записаны сторонним программным обеспечением через GET и PUT HTTP-запросы соответственно. Чтение и запись синхронизируется с циклом ПЛК, и несколько переменных могут быть прочитаны и записаны в рамках одного запроса.

HTTP-запросы могут быть выполнены в виде текста с разделителями-запятыми или в формате JSON (JavaScript Object Notation). Это означает, что приложения могут разрабатываться на любой платформе, которая поддерживает HTTP, и на многих разных языках, например Java, C# и C++.

Функции чтения и записи на языке C# с использованием формата JSON представлены ниже [30].

Функция чтения:

```
static void Main(string[] args)
{
    //указывается IP-адрес устройства
    string controllerIPAddress = "http://127.0.0.1";
    string httpInterfaceURL = "/kas/plcvariables";
    string format = "json";
    //Формирование GET-запроса для переменных travelspeed, machinespeed и
    machinestate
```



```

string httpRequestString = controllerIPAddress + httpInterfaceURL +
"?variables=travelspeed,machinespeed,machinestate&format=" + format;
WebClient client = new WebClient();
try
{
    //Отправка HTTP GET-запроса
    String httpResponseString = client.DownloadString(httpRequestString);
    if (format == "json")
    {
        //Используется JavaScriptSerializer, чтобы преобразовать строку
ответа в специальный словарь JSON
        JavaScriptSerializer serializer = new JavaScriptSerializer();
        Dictionary<string, Dictionary<string, string>> responseDictionary =
serializer.Deserialize<Dictionary<string, Dictionary<string,
string>>>(httpResponseString);
        //Теперь responseDictionary будет содержать карту имени переменной
и ее атрибутов (то есть значение и статус ошибки)
        Dictionary<string, string> attributeDictionary = new Dictionary<string,
string>();
        //Чтобы получить значение и статус ошибки, мы можем использовать
следующий способ:
        attributeDictionary = responseDictionary["travelspeed"];
        string variableValue = attributeDictionary["value"];
        string variableErrorStatus = attributeDictionary["errorstatus"];
        Console.WriteLine("Variablename:
travelspeed\nvalue:{0}\nerrorstatus={1}", variableValue, variableErrorStatus);
    }
}
//Если сервер возвращает код ошибки
catch (WebException someWebException)
{
    if (null != ((HttpWebResponse)someWebException.Response))
    {
        Stream reader =
((HttpWebResponse)someWebException.Response).GetResponseStream();
        byte[] message = new byte[reader.Length];
        reader.Read(message, 0, (int)reader.Length);
        string httpErrorCode = someWebException.Message;
        string httpErrorDescription = Encoding.ASCII.GetString(message);
    }
}
//Если случится другое исключение
catch (Exception someException)
{
    string exceptionMessage = someException.Message;

```

```
}  
}
```

Функция записи:

```
static void Main(string[] args)  
{  
    try  
    {  
        //указывается IP-адрес устройства  
        string controllerIPAddress = "http://127.0.0.1";  
        string httpInterfaceURL = "/kas/plcvariables";  
        string format = "json"; // "text" is also supported  
  
        //Создается словарь в формате json для переменных ПЛК travelspeed,  
machinespeed u machinestate  
        Dictionary<string, string> travelspeedDictionary = new Dictionary<string,  
string>();  
        travelspeedDictionary["value"] = "200.0";  
        Dictionary<string, string> machinespeedDictionary = new Dictionary<string,  
string>();  
        machinespeedDictionary["value"] = "500.0";  
        Dictionary<string, string> machinestateDictionary = new Dictionary<string,  
string>();  
        machinestateDictionary["value"] = "1";  
        Dictionary<string, Dictionary<string, string>> requestBodyDictionary = new  
Dictionary<string, Dictionary<string, string>>();  
        requestBodyDictionary.Add("travelspeed", travelspeedDictionary);  
        requestBodyDictionary.Add("machinespeed", machinespeedDictionary);  
        requestBodyDictionary.Add("machinestate", machinestateDictionary);  
  
        WebClient client = new WebClient();  
        JavaScriptSerializer serializer = new JavaScriptSerializer();  
        // Используется JavaScriptSerializer для преобразования словаря json в  
строку  
        string httpRequestBody = serializer.Serialize(requestBodyDictionary);  
        // Преобразовывается строка в байтовый массив  
        byte[] RequestBodyInByteArray =  
Encoding.ASCII.GetBytes(httpRequestBody);  
        byte[] responseInByteArray = client.UploadData(controllerIPAddress +  
httpInterfaceURL + "?format=" + format, "PUT", RequestBodyInByteArray);  
        string httpResponseBody = Encoding.ASCII.GetString(responseInByteArray);  
        Dictionary<string, Dictionary<string, string>> responseBodyDictionary =  
serializer.Deserialize<Dictionary<string, Dictionary<string,  
string>>>(httpResponseBody);
```

```

    // Подобный код может быть использован для получения возвращенного
    // статуса ошибки для каждой переменной в запросе
    travelspeedDictionary = responseBodyDictionary["travelspeed"];
    // Переменная travelspeedWriteErrorStatus будет содержать состояние
    // ошибки записи для travelspeed
    string travelspeedWriteErrorStatus = travelspeedDictionary["errorstatus"];
}
// Если сервер возвращает код ошибки
catch (WebException someWebException)
{
    string httpErrorCode = someWebException.Message;
    if (null != ((HttpWebResponse)someWebException.Response))
    {
        Stream reader =
        ((HttpWebResponse)someWebException.Response).GetResponseStream();
        byte[] message = new byte[reader.Length];
        reader.Read(message, 0, (int)reader.Length);
        string httpErrorDescription = Encoding.ASCII.GetString(message);
    }
}
// Если случится другое исключение
catch (Exception someException) // If some other exception happens
{
    string exceptionMessage = someException.Message;
}
}

```

Для решения задачи мультикоординатности на языке С# было разработано программное обеспечение использующее вышеупомянутые функции чтения и записи:

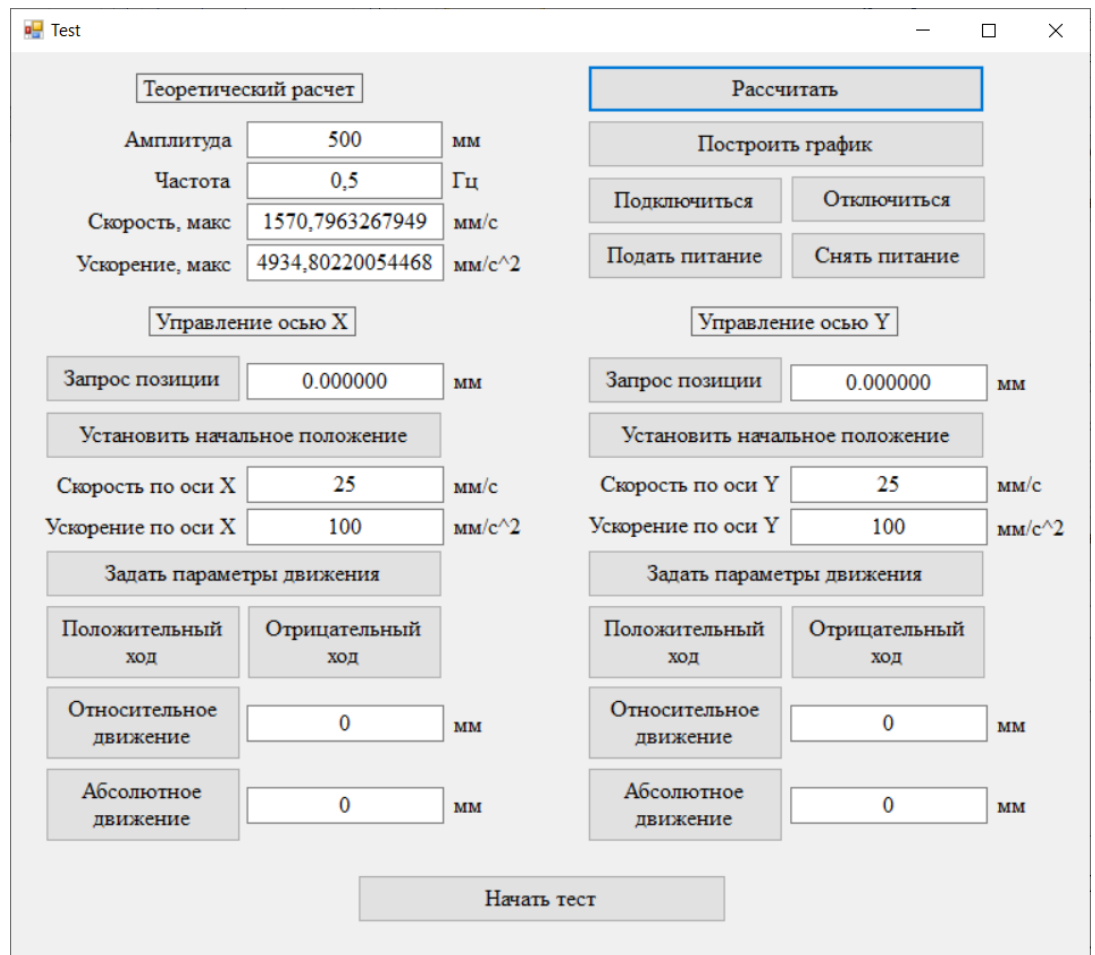


Рисунок 25 – Внешний вид интерфейса программы
мультикоординатности ДУЦ

Данное программное обеспечение позволяет моделировать и рассчитывать координаты и параметры движения каретки, такие как скорость и ускорение по траектории круга.

Для начала предлагается построить теоретический график движения для каждой из осей (X и Y):

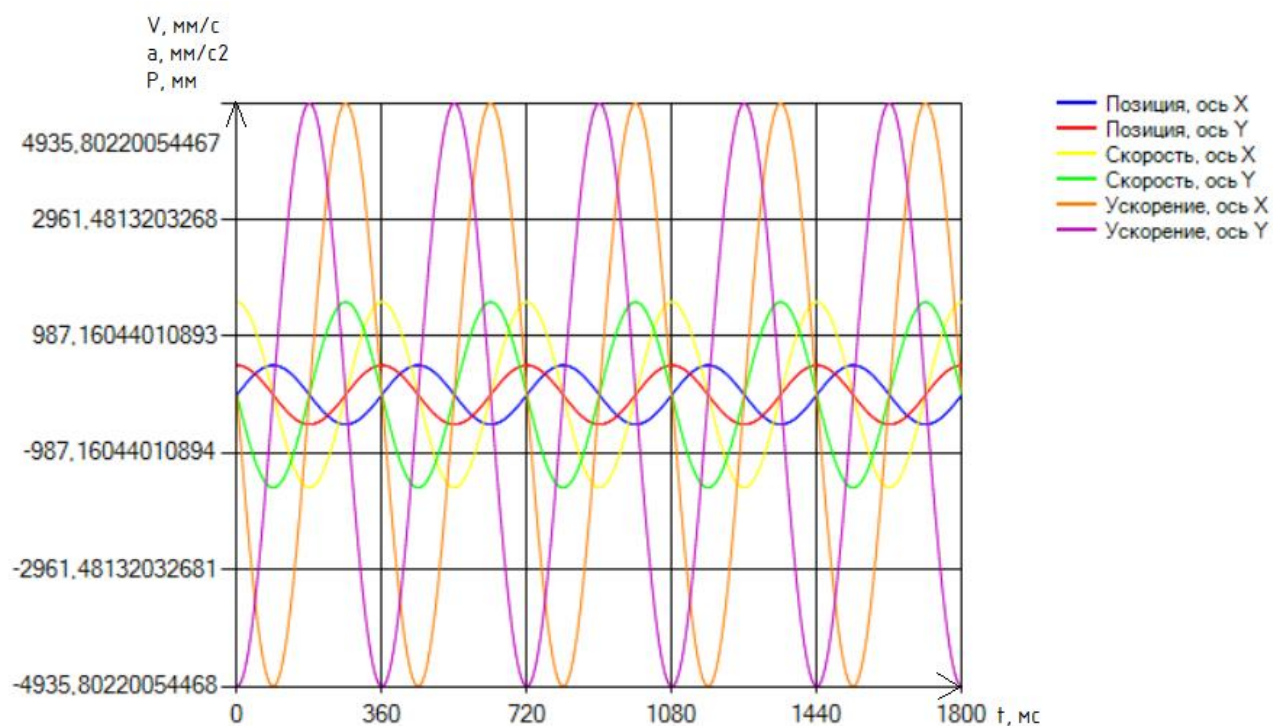


Рисунок 26 – Окно расчета параметров движения по окружности

Полученные при теоретическом расчете скорость и ускорение могут быть заданы в качестве параметров движения, а координаты движения для каждой оси записываются на контроллер движения автоматически.

ПО позволяет подключаться и отключаться от контроллера движения, а также подавать и снимать питание с двигателей обеих осей позиционирования.

Функция подачи и снятия питания обеспечивается стандартным функциональным блоком MC_Power.

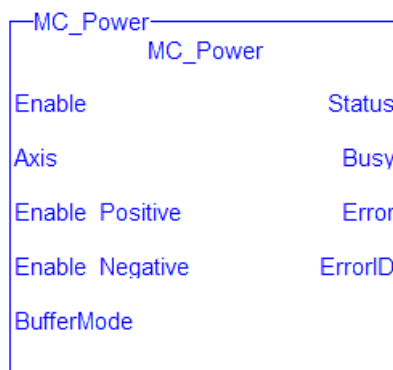


Рисунок 27 – Функциональный блок MC_Power

Синхронизация осей между собой обеспечивается функциональным блоком MC_GearIn. С помощью него есть возможность назначения ведущего и ведомого двигателя, а так же передаточное число, если необходимо.

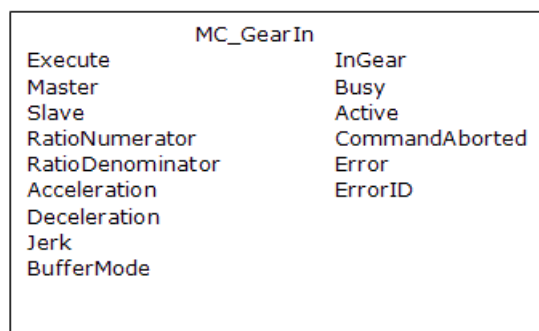


Рисунок 28 – Функциональный блок MC_GearIn

Поиск начальной позиции каретки может быть начат нажатием на соответствующую кнопку и выполняется в автоматическом режиме. Для этой задачи используются блоки MC_Reference и MC_SetPos, показанные на рисунках 29 и 30 соответственно.

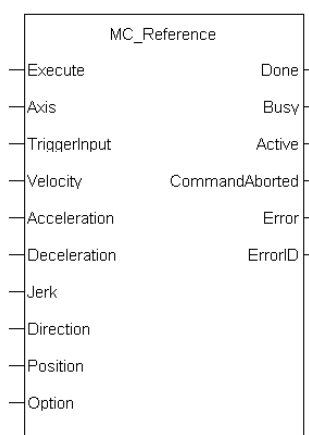


Рисунок 29 – Функциональный блок MC_Reference

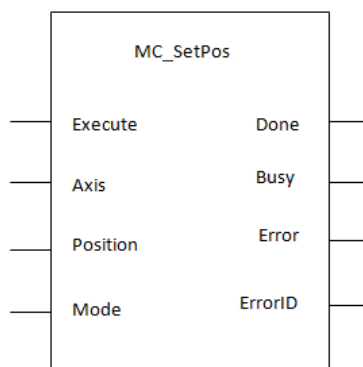


Рисунок 30 – Функциональный блок MC_SetPos

Отличие в работе данных блоков заключается в том, что блок MC_Reference служит для поиска референтной метки и концевого выключателя, а блок MC_SetPos устанавливается текущую позицию двигателя в качестве начального положения для последующего позиционирования.

Текущая позиция каретки может быть запрошена в любой удобный момент. Для этого используется блок и MC_ReadActPos:

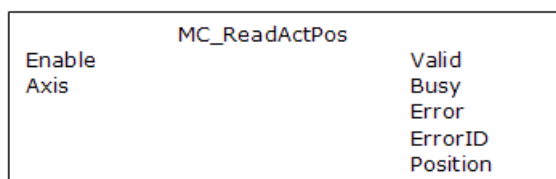


Рисунок 31 – Функциональный блок MC_ReadActPos

Кнопки «Положительный ход» и «Отрицательный ход» служат для позиционирования каретки в ручном режиме. По нажатию и удержанию одной из этих кнопок каретка придет в движение с заданной скоростью и ускорением и будет продолжаться до отпускания кнопки. Эту функцию обеспечивает блок JogAxis:

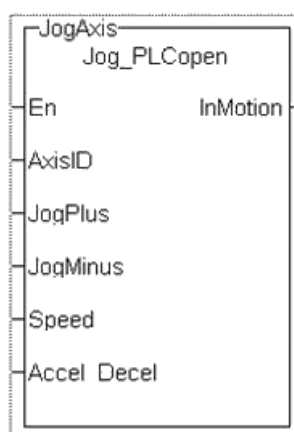


Рисунок 32 – Функциональный блок JogAxis

Кнопки «Абсолютное движение» и «Относительное движение» как следует из названия позволяют позиционировать каретку в абсолютную позицию относительно нуля и позицию относительно текущего положения.

Блок осуществляющий абсолютное движение называется MC_MoveAbsolute, а блок осуществляющий относительное движение – MC_MoveRelative, показанные на рисунках 33, 34 соответственно.

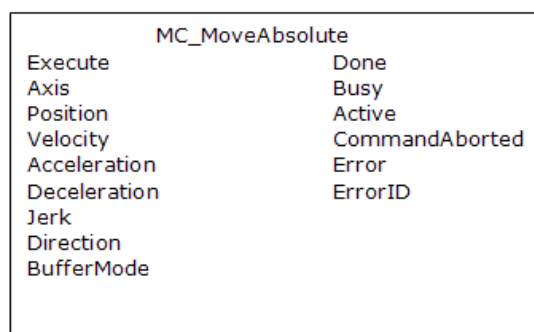


Рисунок 33 – Функциональный блок MC_MoveAbsolute

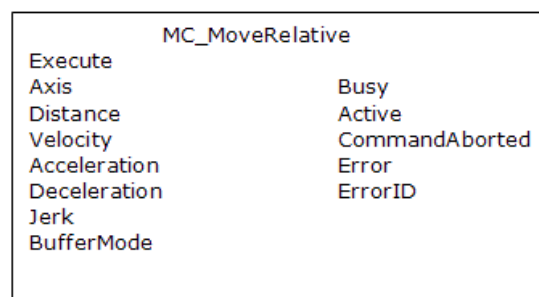


Рисунок 34 – Функциональный блок MC_MoveRelative

Блоки MC_MoveAbsolute и MC_MoveRelative могут использоваться для движения по произвольной траектории. Для этого в поля «Position» и «Distance» должна быть передана следующая координата. Поле «BufferMode» служит для буферизации следующей точки движения, то есть в один момент времени блок может осуществлять движение в заданную точку и хранить в памяти следующую точку, движение в которую начнется сразу после окончания движения с новой или той же скоростью.

Основная кнопка «Начать тест» запускает движение по траектории с заданными параметрами.

Если функция движения заранее известна, то позиционирование может быть начато с использованием встроенных функций.

В данный момент реализовано движение по известной заранее траектории круга с заданным радиусом. Для этого используется функция MC_MoveCircAbs:

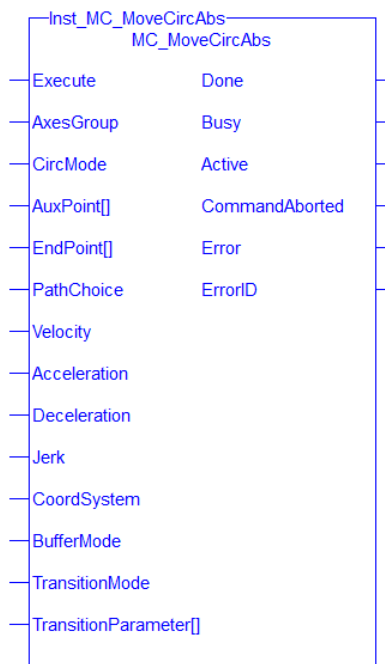


Рисунок 35 – Функциональный блок MC_MoveCircAbs

5 Разработка методики проведения испытаний. Результаты экспериментов

Объектом испытаний является динамический узел цели (ДУЦ), изготовленный в рамках выполнения составной части научно-исследовательской работы «Разработка испытательного комплекса лаборатории комплексных испытаний для проведения полунатурных испытаний».

Целью испытаний является проверка соответствия технических характеристик объекта испытаний требованиям технического задания (ТЗ) на составную часть научно-исследовательской работы «Разработка испытательного комплекса лаборатории комплексных испытаний для проведения полунатурных испытаний» в части ДУЦ. В рамках испытаний ДУЦ проводятся испытания в соответствии с таблицей 11 [31].

Таблица 11 - Объем и последовательность испытаний ДУЦ

Требования	Метод проведения испытаний
Проверка возможности стойки управления ДУЦ работы в следующих режимах: - ручного управления; - автономного тестирования; - тестирования от внешнего компьютера; - комплексном (режим моделирования при управлении от внешнего компьютера).	5.2.1
Проверка максимальной линейной скорости, которая должна быть не менее 5 м/с.	5.2.2
Проверка максимального ускорения, которое должно быть не менее 20 м/с ² .	5.2.3

Продолжение таблицы 11

<p>Проверка среднеквадратичного отклонения статической ошибки обработки положения ИЦ, которое должно быть не более 0,005 м.</p>	<p>5.2.4</p>
<p>Проверка абсолютных значений динамических погрешностей воспроизведения синусоидальных сигналов по положению (с амплитудой скорости не более 60% от максимальной), измеренные по первой гармонике сигнала отработанного положения в полосе рабочих частот:</p> <ul style="list-style-type: none"> - по амплитуде, которые должны быть не более 10%; - по фазе, которые должны быть не более 10°. 	<p>5.2.5</p>
<p>Проверка полосы рабочих частот, которая должна быть не менее 1 Гц.</p>	<p>5.2.6</p>
<p>Проверка возможностей ПО обеспечивать проведения испытаний и технического обслуживания ДУЦ.</p> <p>Проверка возможности обмена данными между ПК и ПО с использованием интерфейса Ethernet.</p> <p>Проверка наличия удобного интерфейса пользователя, предоставляющего оператору статусную информацию о текущем состоянии узла цели, положениях каналов, а также сообщающего о возникновении аварийной ситуации или внештатном поведении изделия.</p>	<p>5.2.7</p>

5.1 Общие положения, условия и порядок проведения испытаний

5.1.1. Результаты испытаний ДУЦ считают положительными, а комплект выдержавшим испытания, если он испытан в объеме и последовательности установленным настоящей ПМ для каждой категории испытаний и результаты испытаний соответствуют требованиям настоящей ПМ.

5.1.2 Результаты испытаний ДУЦ считают отрицательными, а комплект не выдержавшим испытания, если по результатам испытаний будет установлено несоответствие хотя бы одному требованию настоящей ПМ.

5.2 Методы проведения испытаний

5.2.1 Методика проверки возможности стойки управления ДУЦ работы в следующих режимах:

- ручного управления
- автономного тестирования
- тестирования от внешнего компьютера;
- комплексном (режим моделирования при управлении от внешнего компьютера)

Проверка работы ДУЦ в режиме ручного управления производится путем включения ДУЦ согласно руководства по его эксплуатации и управления ДУЦ с использованием пульта дистанционного управления (ПДУ). Управление ДУЦ с ПДУ осуществляется путем нажатия кнопок «Вверх», «Вниз», «Влево», «Вправо», позиционирующих ИЦ ДУЦ или вводом требуемой конечной позиции ИЦ ДУЦ по осям ОХ и ОУ и запуска движения кнопками «Относительное движение» и «Абсолютное движение» с контролем позиции отображаемой на ПДУ.

Результат проверки считается положительным, если управление ДУЦ, а именно позиционирование ИЦ, с ПДУ было успешно произведено, т.е. осуществлялось движение кареток ДУЦ в соответствии

с заданием, а ошибок при позиционировании не возникало, и текущая позиция кареток ДУЦ всегда выводилась на ПДУ.

Проверка работы ДУЦ в режиме автономного тестирования производится с помощью выбора вкладки «Автономное тестирование» расположенной на ПДУ.

Результат проверки работы в режиме «Автономное тестирование», «Тестирование от внешнего компьютера», «Комплексный» считается положительным, если данные режим работы обеспечили возможность проведения всего объема испытаний ПМ ДУЦ.

5.2.2 Методика проверки максимальной линейной скорости, которая должна быть не менее 5 м/с.

Для проведения испытания максимальной линейной скорости кареток ДУЦ следует использовать ПО оператора ДУЦ, установленное на внешнем компьютере или ПДУ. В ПО необходимо выбрать вкладку «Автономное тестирование», а во вкладке выбрать закладку «Максимальная скорость» и запустить тест.

Максимальная скорость, достигнутая в результате теста, вычисляется автоматически и отображается на экране монитора для ознакомления оператором.

Максимальная скорость рассчитывается на основе данных получаемых с датчиков обратной связи установленных на каждой линейной оси движения.

Результат проверки считается положительным, если скорость движения кареток с ГМЭ ИЦ достигнутая в результате теста соответствует требованиям ТЗ и фактическая измеренная скорость составляет не менее 5 м/с.

5.2.3 Методика проверки максимального ускорения, которое должно быть не менее 20 м/с².

Испытание производится аналогично проверке в п. 4.2.12 ПМ за исключением того, что во вкладке «Автономное тестирование» оператор выбирает закладку «Максимальное ускорение».

Максимальное ускорение, достигнутое в результате теста, вычисляется автоматически и отображается на экране монитора для ознакомления оператором.

Максимальное ускорение рассчитывается на основе данных о скорости получаемых с датчиков обратной связи, которые установлены на каждой линейной оси движения, относительно времени, затраченного на достижение заданной скорости по формуле:

$$a = \frac{v}{t}$$

Результат проверки считается положительным, если ускорение движения кареток достигнутое в результате теста соответствует требованиям ТЗ и рассчитанное ускорение составляет не менее 20 м/с².

5.2.4 Методика проверки среднеквадратичного отклонения статической ошибки отработки положения ИЦ, которое должно быть не более 0,005 м.

Поочередно на каждую из кареток ДУЦ устанавливается специальная измерительная оснастка для работы с лазерным интерферометром RENISHAW XL-80;

Калибровка прибора RENISHAW XL-80 выполняется с помощью испытательной оснастки, входящей в его состав. Оператор проверяет работоспособность и настройки прибора в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

Для измерения точности позиционирования каретки выставляются в нулевое положение, на приборе значения обнуляются.

Оператор ДУЦ с ПК дает задание на периодическое перемещение одной из кареток по одной оси путем нажатия на кнопку «Запустить тест». Перемещение каретки по выбранной оси производится по всей длине оси, на скорости 100 мм/с, с шагом 100 мм и паузой между шагами равной 1 с.

При достижении кареткой заданной позиции, измерительное оборудование выполняет фактическое измерение перемещения каретки

относительно нулевого положения с помощью ПО входящего в состав прибора (RENISHAW XL-80).

Полученные данные сформированы ПО, входящим в состав прибора RENISHAW XL-80, и занесены в таблицу.

Данные полученные от измерительного оборудования должны быть внесены в блок «Погрешность позиционирования». Путем нажатия на кнопку «Расчет» вычисляются значения среднеквадратичного отклонения статической ошибки отработки положения ИЦ.

Статическая ошибка вычисляется, как отношение разности заданного значения и измеренного к заданному значению, а среднеквадратичное отклонение, как корень квадратный из дисперсии статической ошибки, для каждой оси.

Для определения среднеквадратичного отклонения статической ошибки отработки положения ИЦ режим «Автономное тестирование» предусматривает блок «Погрешность позиционирования». Измерение погрешности предусматривает тестирование точности позиционирования каретки по каждой оси по отдельности. В данном блоке оператор выбирает ось позиционирования X или Y и начинает тестирование путем нажатия на кнопку «Запустить тест». Перемещение каретки по выбранной оси производится по всей длине оси, на скорости 100 мм/с, с шагом 100 мм и паузой между шагами равной 1 с.

Такие же параметры испытания должны быть выставлены на измерительном лазерном оборудовании RENISHAW XL-80 в соответствии с руководством по его эксплуатации. Так как измерение погрешности позиционирования производится внешним устройством не входящем в состав ДУЦ, результаты погрешности фиксируются и предоставляются внешним устройством в качестве таблицы с данными. После получения результатов их следует внести в блок «Погрешность позиционирования» и путем нажатия на кнопку «Расчет» получить значения среднеквадратичного отклонения статической ошибки отработки положения ИЦ, которое в автоматическом режиме будет внесено в ПО оператора ДУЦ во вкладку «Поправочные

коэффициенты».

Для определения динамических погрешностей режим «Автономное тестирование» предусматривает блок «Динамическая погрешность». В данном блоке оператор выбирает параметры тестирования, такие как «Амплитуда», «Частота», «Среднее положение» и «Количество периодов» из предложенных программой. Затем путем нажатия кнопки «Запустить тест» оператор начинает испытание, при котором каретки отрабатывают движение по синусоиде с выбранными параметрами. После завершения теста автоматически производится расчет амплитудной и фазовой погрешности. Оценка динамических погрешностей производится по результатам сравнения заданного синусоидального сигнала и первой гармоники отработанного движения кареток, рассчитанной с использованием преобразования Фурье.

Расчет численных значений динамических погрешностей осуществляется по формулам [32]:

$$\Delta A = \left(\frac{A_{1 \text{ гарм}}}{A_3} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

$$\Delta \varphi = \varphi_{1 \text{ гарм}} - \varphi_3,$$

где $A_{1 \text{ гарм}}$, A_3 – рассчитанная и заданная амплитуда соответственно;

$\varphi_{1 \text{ гарм}}$, φ_3 – рассчитанная и заданная фаза соответственно.

Полученные погрешности отображаются в блоке «Динамические погрешности».

Результат проверки считается положительным, если среднеквадратичное отклонение статической ошибки отработки положения ИЦ составляет менее 0,005 м.

5.2.5 Методика проверки абсолютных значений динамических погрешностей воспроизведения синусоидальных сигналов по положению (с амплитудой скорости не более 60% от максимальной), измеренные по первой гармонике сигнала отработанного положения в полосе рабочих частот:

- по амплитуде, которые должны быть не более 10%;
- по фазе, которые должны быть не более 10°.

Данная проверка проводится совместно с п. 5.2.6 ПМ. учетом значения амплитуды перемещения.

5.2.6 Методика проверки полосы рабочих частот, которая должна быть не менее 1 Гц.

Испытание производится с использованием ПО ДУЦ от ПДУ или от внешнего ПК в части работы блока «Динамическая погрешность».

В данном блоке оператор выбирает параметры тестирования, такие как «Амплитуда», «Частота», «Среднее положение» и «Количество периодов» из предложенных программ. Затем путем нажатия кнопки «Запустить тест» оператор начинает испытание, при котором каретки отрабатывают движение по синусоиде с выбранными параметрами. После завершения теста автоматически производится расчет амплитудной и фазовой погрешности. Оценка динамических погрешностей производится по результатам сравнения заданного синусоидального сигнала и первой гармоники отработанного движения кареток, рассчитанной с использованием преобразования Фурье.

Расчет численных значений динамических погрешностей осуществляется по формулам:

$$\Delta A = \left(\frac{A_{1 \text{ гарм}}}{A_3} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

$$\Delta \varphi = \varphi_{1 \text{ гарм}} - \varphi_3,$$

где, A_3 – рассчитанная и заданная амплитуда соответственно;

$\varphi_{1 \text{ гарм}}$, φ_3 – рассчитанная и заданная фаза соответственно.

Полученные погрешности отображаются в блоке «Динамические погрешности».

Результат проверки считается положительным, если абсолютные значения динамических погрешностей воспроизведения синусоидальных сигналов по положению (с амплитудой скорости не более 60% от максимальной), измеренные по первой гармонике сигнала отработанного

положения в полосе рабочих частот от 1 Гц и выше, по амплитуде составляют менее 10%, по фазе – менее 10°.

5.2.7 Проверка возможностей ПО обеспечивать проведения испытаний и технического обслуживания ДУЦ, проверка возможности обмена данными между ПК и ПО с использованием интерфейса Ethernet, а также проверка наличия удобного интерфейса пользователя, предоставляющего оператору статусную информацию о текущем состоянии узла цели, положениях каналов и сообщаемого о возникновении аварийной ситуации или внештатном поведении изделия.

Возможность проведения испытаний и технического обслуживания используя ПО, а также возможность обмена данными между ПК и ПО с использованием интерфейса Ethernet подтверждается положительными результатами проведения всего объема испытаний ПМ ДУЦ.

5.3 Порядок проведения испытаний оборудования и их результаты

Для проведения испытаний были использованы: ноутбук ASUS FX504GD-E41023T с программным обеспечением DriveGUI v.3.4.0 и Kollmorgen Automation Suite Integrated Development Environment (KAS IDE) v. 3.02.

Производится внешний осмотр ДУЦ (далее – «Изделие»), проверяется легкость и плавность хода перемещений подвижных частей (линейное перемещение кареток) правильность кабельных соединений.

В фиксированном положении производится включение изделия в соответствии с руководством по его эксплуатации. Далее для проверки общей работоспособности, оператор, используя установленную программу на ноутбуке KAS IDE, которая сообщается с контроллером движения посредством Ethernet TCP/IP, подает задание на движение при минимальной скорости по каждой из осей. Результат считается положительным, если изделие заняло заданную позицию без ошибок.

Далее, оператор, используя ПО KAS IDE, в соответствии со следующими пунктами должен произвести следующие эксперименты:

1) Движение мачты по вертикальной оси с параметрами $v = 5 \text{ м/с}$, $a = 20 \text{ м/с}^2$;

2) Движение платформы по горизонтальной оси с параметрами $v = 5 \text{ м/с}$, $a = 20 \text{ м/с}^2$;

3) Совместное движение осей с траекторией в форме круга.

Перед началом каждого эксперимента мачта и каретка выставляются в нулевое положение. При запуске режима движения оператор выполняет фактическое измерение скорости движения каретки с помощью осциллографа, входящего в состав сервоусилителя. Данные о максимальной линейной скорости оцениваются по графику движения на участке после разгона и до торможения, полученному в результате проверки. График предоставляется в виде рисунка, выгружаемого из ПО.

Данные о максимальном линейном ускорении рассчитываются оператором по графику движения на участке от начала движения и до окончания разгона, а также от начала торможения и до полной остановки.

Результат проверки считается положительным, если измеренная с помощью встроенных осциллографов скорость движения каретки изделия и рассчитанное ускорение соответствуют требованию испытания с допустимой погрешностью $\pm 10\%$ на основе технического задания.

При невозможности выполнения изделием требуемого эксперимента при заданных параметрах движения необходимо найти максимально возможные параметры для обеспечения движения.

Итоги экспериментов по каждому пункту заносятся в таблицу результатов, осциллографируя результат каждого испытания встроенным в сервоусилители осциллографом, и присваивая ему свой соответствующий порядковый номер. Полученные в ходе испытаний результаты представлены в таблице 12.

Таблица 12 - Результаты испытаний

Название проверки	Требование по программе испытаний		Краткое описание результата	Отчетный документ
	Требование	исполнение		
Движение по вертикальной оси	$v_{\max} = 5$ м/с $a_{\max} = 20$ м/с ²	$v_{\max} = 5$ м/с $a_{\max} = 20$ м/с ²	Ошибка исполнения требования находится в 10% зоне допустимой погрешности. Во время разгона в начальный момент времени ≤ 1.5 с наблюдается кратковременный выход за пределы 10% зоны (на 1.5%).	Рисунок 36
Движение по горизонтальной оси	$v_{\max} = 5$ м/с $a_{\max} = 20$ м/с ²	$v_{\max} = 5$ м/с $a_{\max} = 6$ м/с ²	При заданных требованиях наблюдается ошибка следования и аварийный останов двигателей. Требования $v = 5$ м/с, $a = 6$ м/с ² не вызывают остановки, однако не исполняются: <ul style="list-style-type: none"> – достигнутая скорость – 4,5 м/с (большую скорость каретка не успевает набрать из-за малой длины пути); – при этом ошибка исполнения требования находится в 10% зоне допустимой погрешности. 	Рисунок 37
Совместное движение осей	Траектория – окружность $f = 1/\pi$ Гц $R = 0,5$ м		Результат осциллографирования позиции и скорости по вертикальной оси при проведении эксперимента приведен на рисунках 38, 39 соответственно. Для оценки правильности выполнения задания на движения на графиках далее приводится «теоретическая» кривая функции синуса с заданными параметрами ($f = 1/\pi$ Гц, $R = 0,5$ м). Видно, что в начале эксперимента (до полного прохода одного периода колебаний) двигатель двигается по синусоидальной траектории, исполняя требования	Рисунки 38-42
	$v_{\max} = 2\pi f \cdot R = 1$ м/с $a_{\max} = 4\pi^2 f^2 \cdot R = 2$ м/с ²			

Продолжение таблицы 12

Название проверки	Требование по программе испытаний	Краткое описание результата	Отчетный документ
		<p>эксперимента. Затем наблюдается простой двигателя (позиция и скорости равные нулю). Простой связан с ожиданием завершения исполнения задания по горизонтальной оси. Далее движение продолжается еще два периода, после чего простой повторяется. Причины и способы устранения простоя требуют дополнительных экспериментов, здесь приведем анализ двух периодов, в которых простоя не наблюдался. Для этого потребуется совместить начало теоретической кривой и данных эксперимента по оси времени (см. рисунки 40, 41). Из данных на рисунках 40, 41 видно, что в период стабильной работы каретка движется по синусоидальной траектории. Оценка ошибок занятия позиции приведена на рисунке 42. Из него видно, что ошибка по позиции (амплитуде) – находится в пределах $\pm 1\%$ (задание-исполнение), отклонение от функции синуса находится в пределах $\pm 2,5\%$ (теория-исполнение)</p>	

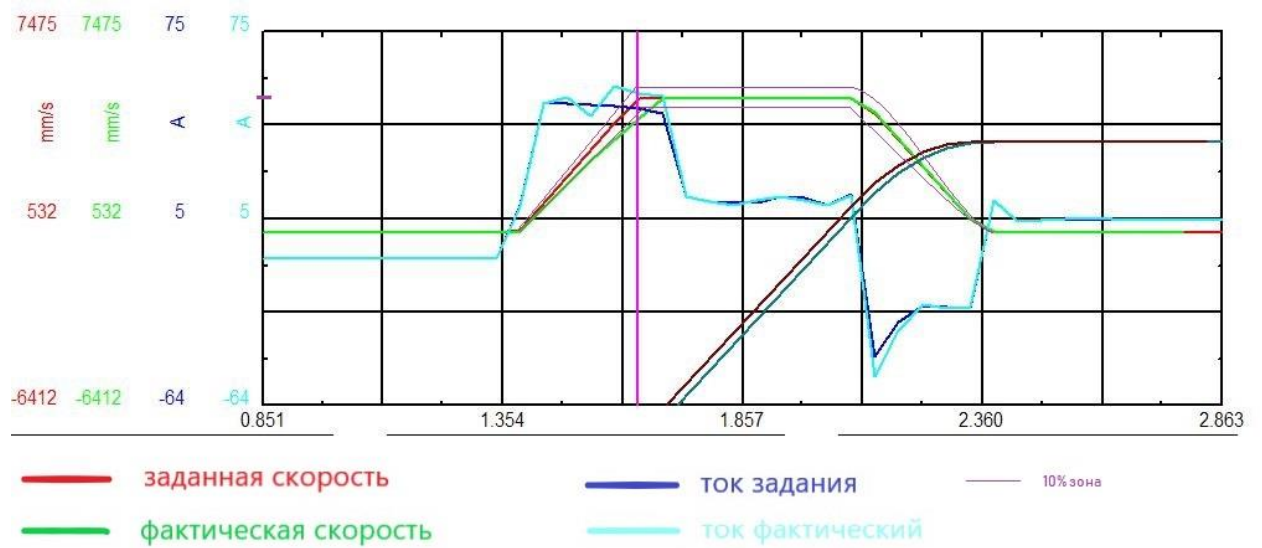


Рисунок 36 – К проверке движения по вертикальной оси (таблица 11)

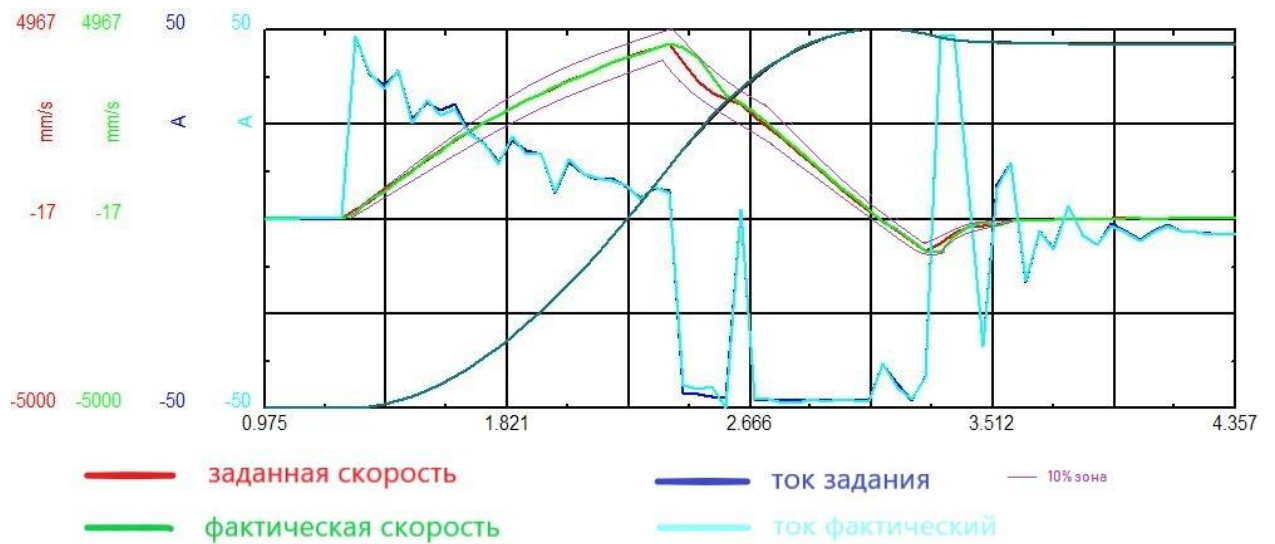


Рисунок 37 – К проверке движения по горизонтальной оси (таблица 11)

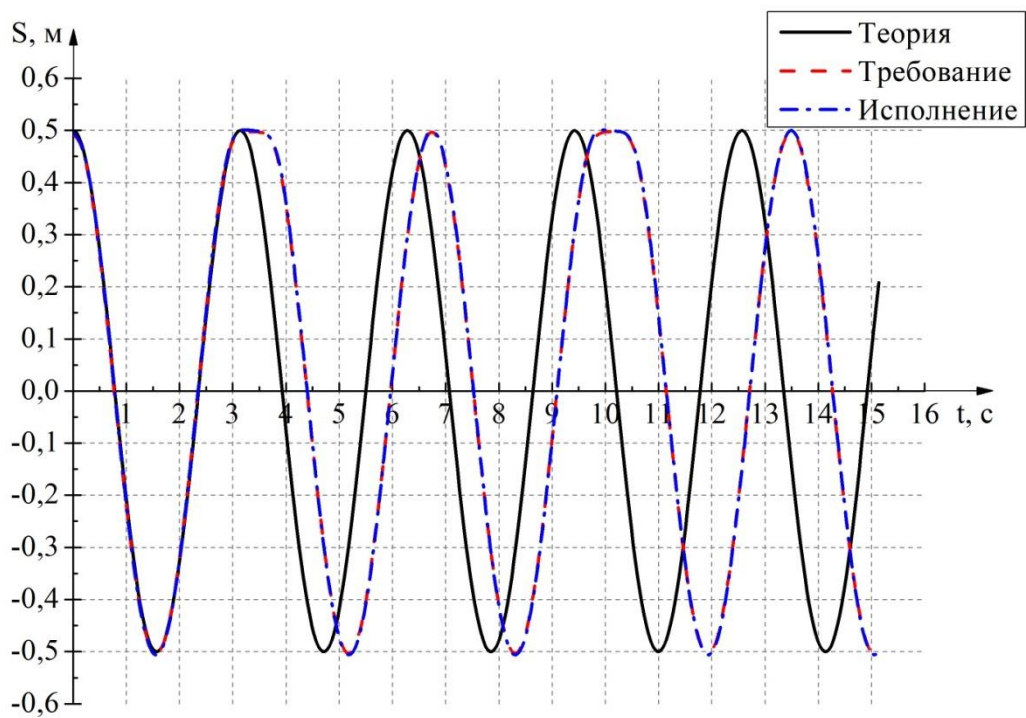


Рисунок 38 - Значение позиции в зависимости от времени, к эксперименту по отработке траектории движения каретки по окружности (таблица 11)

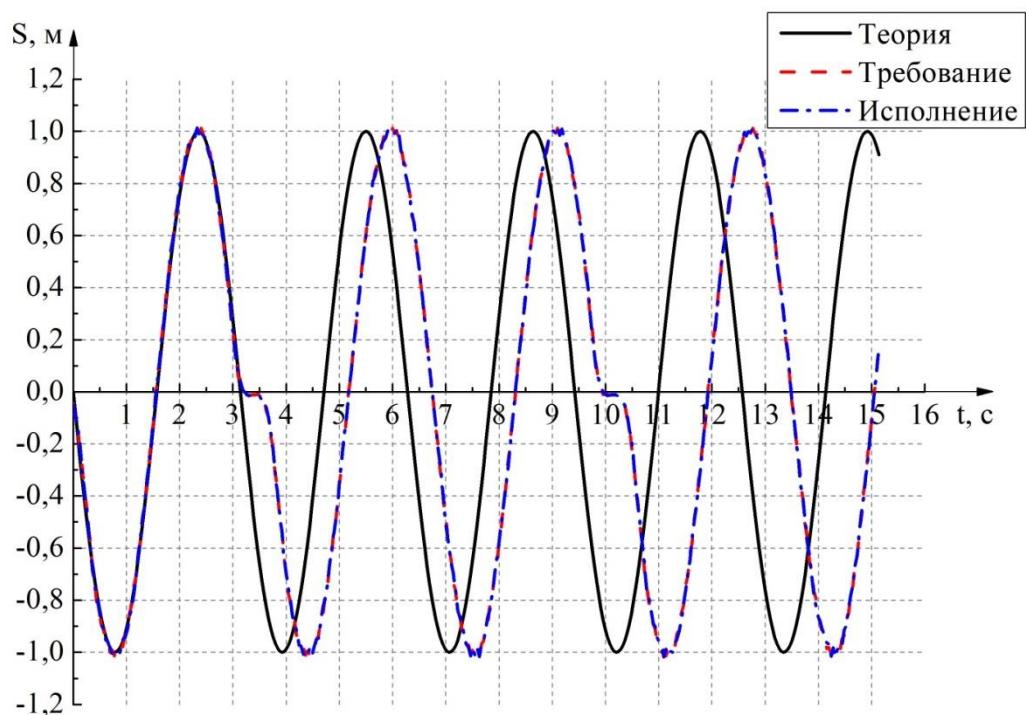


Рисунок 39 – Значение скорости в зависимости от времени, к эксперименту по отработке траектории движения каретки по окружности (таблица 11)

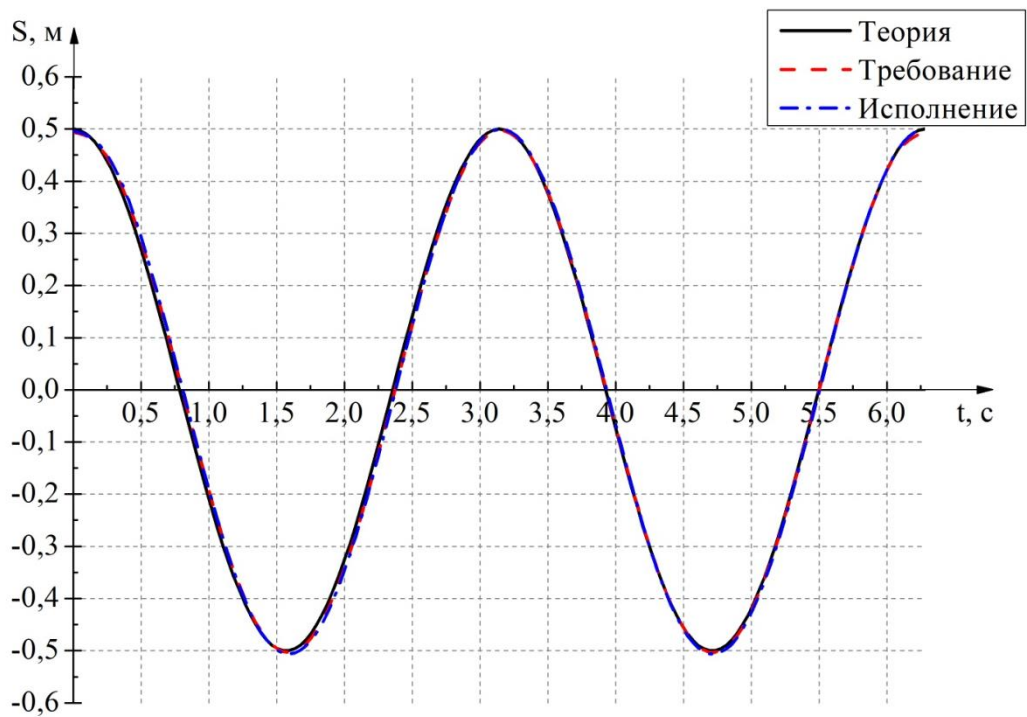


Рисунок 40 – Значение позиции в зависимости от времени (два периода), к эксперименту по отработке траектории движения каретки по окружности (таблица 11)

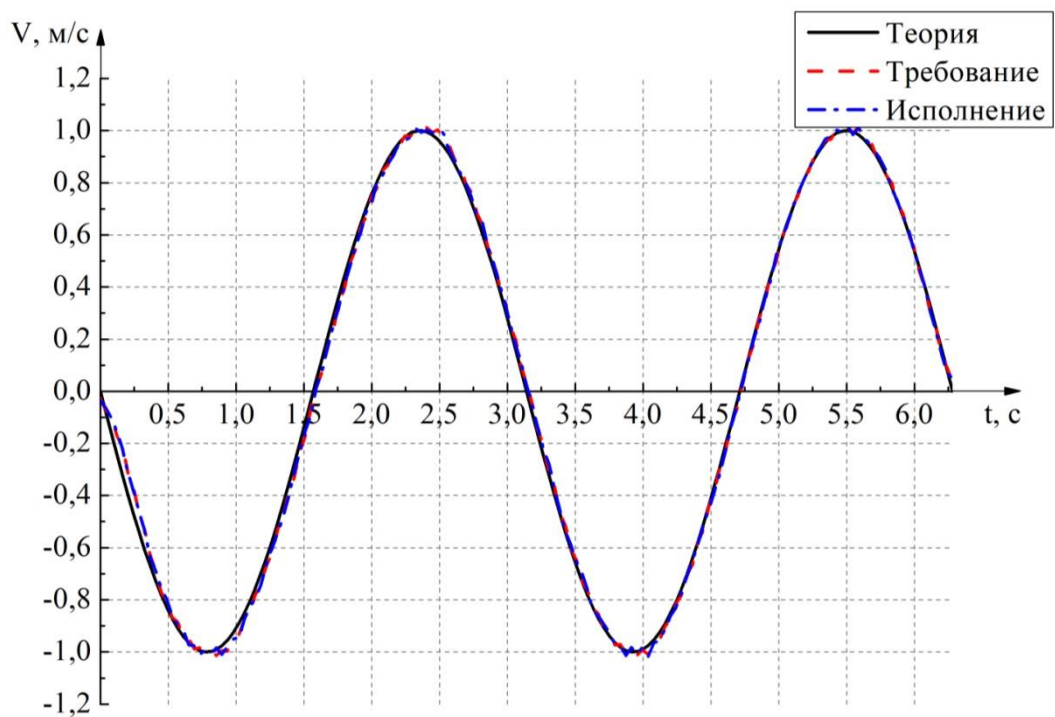


Рисунок 41 – Значение скорости в зависимости от времени (два периода), к эксперименту по отработке траектории движения каретки по окружности (таблица 11)

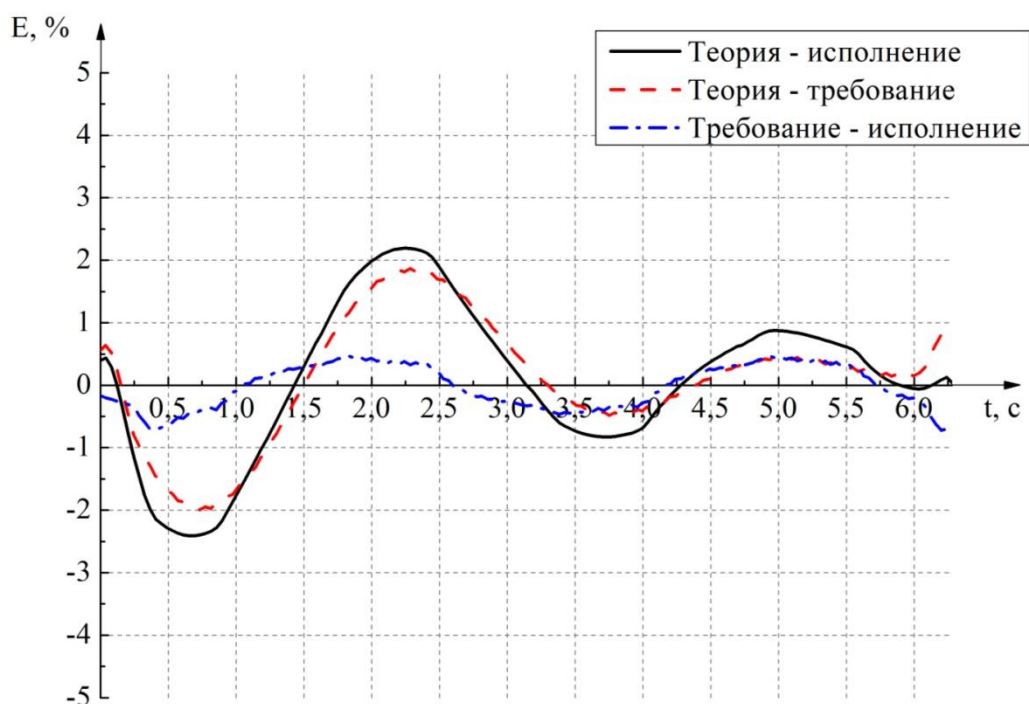


Рисунок 42 – Ошибка занятия позиции, к эксперименту по отработке траектории движения каретки по окружности (таблица 11)

На основании произведенных экспериментов, можно сделать выводы:

- По линии вертикального движения ДУЦ достигнута максимальная скорость движения каретки 5 м/с при ускорении 20 м/с²
- Максимально возможные параметры движения, не вызывающие аварийного останова двигателей горизонтального движения ДУЦ МАВИ.441546.001 – 5 м/с при ускорении 6 м/с². При этом максимально достигнутая скорость – 4,5 м/с. Исходя из рисунка 27, данная скорость была достигнута за 1,1 с, что говорит о движении с ускорением порядка 5 м/с². При учете массы вертикальной мачты в 450 кг, расчетная сила, действующая на мачту со стороны двигателей (по второму закону Ньютона): $F = m \cdot a = 450 \cdot 5 = 2250$ Н. Данная оценка показывает (без учета трения, сопротивления воздуха и других факторов), что двигатели горизонтальной оси в заданном режиме работают на пределе возможности (суммарное номинальное усилие двигателей – 2356 Н). Произведенная оценка позволяет определить максимально

допустимое ускорение, которое возможно требовать от линии горизонтального движения ДУЦ – не более 5 м/с^2 .

– Проведенный эксперимент исполнения траектории движения по окружности с параметрами $f = 1/\pi$ Гц, $R = 0,5$ м показал принципиальную возможность исполнения данной траекторией с заданными пределами погрешности. Однако, при выполнении эксперимента наблюдались простои в работе вертикальной линии движения. Причины и способы устранения которых требуют проведения повторного эксперимента с данными параметрами. Кроме этого, эксперимент показал, что параметры движения по окружности (частота и радиус) строго определяют зависимость от данных параметров скорости и ускорения, определяющих задание на движение.

– Таким образом, путем математических выкладок можно доказать, что невозможно подобрать такие частоты и радиусы окружностей, при которых максимальные значения скорости и ускорения одновременно будут соответствовать требованиям ТЗ: частота 1 Гц, скорость 5 м/с при ускорении 20 м/с^2 . В частности, при определенной в ТЗ частоте в 1 Гц, максимально возможный радиус окружности, при котором значение ускорения не превысит 20 м/с^2 – это 0,5 м. Скорость при этом будет равна $v_{\max} = \pi$ м/с. А с учетом ограничений по ускорению в 5 м/с^2 по горизонтальной линии движения радиус окружности при частоте в 1 Гц не должен превышать 0,125 м.

– Полученные результаты могут быть использованы для уточнения расчетных максимальных значений динамических характеристик ДУЦ (требование технического задания к ДУЦ: скорость – 5 м/с, ускорение – 20 м/с^2) и внесения изменения в конструкцию вертикальной мачты с целью снизить ее массу и снять ограничение по ускорению. Полученные выводы по движению по окружности позволяют составить программу и методику аттестации ДУЦ в части отработки точности занимаемых положений в динамике движения

каретки. Предложения по параметрам окружности при приемочных испытаниях ДУЦ приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Варианты параметров траектории «окружность» для испытаний ДУЦ

Режим	Частота f, Гц	Радиус R, м	Макс. скорость $v_{\max}=2\pi f \cdot R$, м/с	Макс. ускорение $a_{\max}=4\pi^2 f^2 \cdot R$, м/с ²
Макс. ускорение при макс. частоте	1	1,591/π	3,182	19,993
Макс. ускорение при макс. радиусе	2/π	1,25	5	20
Макс. скорость при макс. частоте	1	1,591/π	3,182	19,993
Макс. скорость при макс. радиусе	1/2π	5	5	5

Анализ полученных результатов испытаний ДУЦ показал необходимость внесения изменений в существующую конструкцию.

Требуемые динамические характеристики ДУЦ не достигаются по горизонтальной оси из-за значительной массы вертикальной оси (450 кг). Тяговые усилия двух линейных двигателей (по 1178 Н каждый) недостаточны.

Согласно 2-му закону Ньютона для поступательного движения:

$$m = \frac{F}{A} = \frac{2356}{20} = 117,8 \text{ кг} \sim 120 \text{ кг}$$

Соответственно, вес вертикальной мачты текущей конструкции должен быть равен 120 кг, либо при текущем весе в 450 кг необходимо увеличить тяговые усилия линейных двигателей до $F = ma = 450 \cdot 20 = 9000 \text{ Н}$, при заданном ускорении 20 м/с² в техническом задании на ДУЦ, однако в этом случае не будет выполняться условие по максимальному энергопотреблению в 100 кВт.

Исходя из 2-го закона Ньютона для достижения поставленной цели необходимо снижение массы вертикальной мачты.

Чтобы снизить массу вертикальной мачты до необходимых 120 кг необходимо переработать ее существующую конструкцию. Новая конструкция должна одновременно иметь малый вес и обеспечить достаточную жесткость при своем перемещении и перемещении по ней каретки с полезной нагрузкой с заданной скоростью и ускорением. При этом необходимо изменить вид привода подвижной каретки с линейного двигателя, установленного на подвижной каретке, на вращательный привод с армированным зубчатым ремнем. Это существенно снизит вес, позволит уменьшить ломающие воздействия при движении. За счет применения ременной передачи основные веса в конструкции переместятся к местам крепления вертикальной оси к горизонтальным осям, расположенным вверху и внизу ДУЦ, что позволит спроектировать более легкую и при этом достаточно жесткую конструкцию вертикальной оси (рисунок 50).

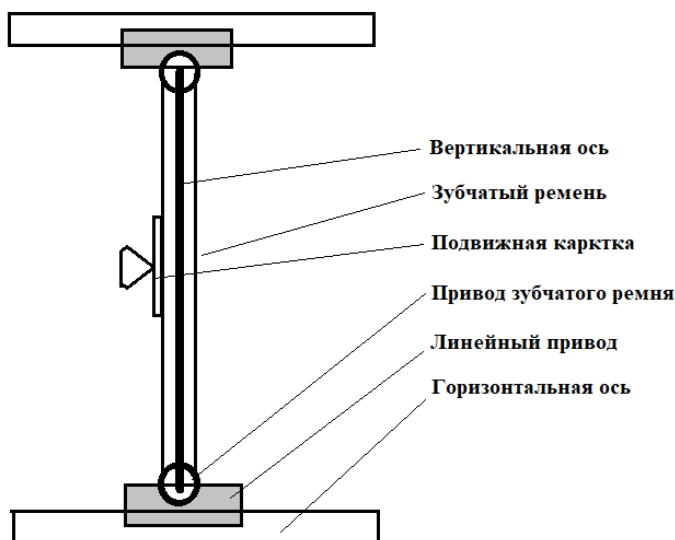


Рисунок 43 - Вертикальная ось ДУЦ с ременным приводом.

Исходя из всего вышесказанного, можно сформировать список рекомендаций:

1. Спроектировать вертикальную ось ДУЦ так, чтобы ее масса с полезной нагрузкой, двумя приводами, приводящими в движение подвижную каретку и зубчатым ремнем, была не более 120 кг.

2. Увеличить мощности сервоусилителей и количество линейных двигателей соответственно.

3. Если первое условие исполнимо частично из-за несовершенства и высокой массы комплектующих частей вертикальной оси, а второй пункт неисполним полностью из-за отсутствия резерва по электрической мощности, то необходимо изменять требования технического задания по ускорению с 20 м/с^2 до приемлемых (исходя из веса спроектированной новой вертикальной оси), график зависимости возможного ускорения от массы вертикальной мачты показан на рисунке 51.

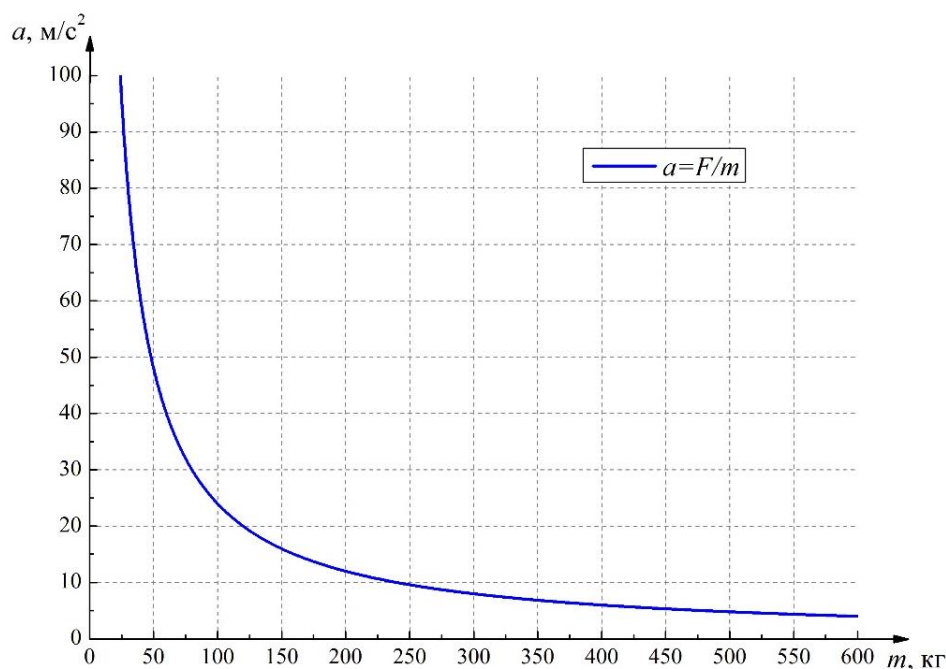


Рисунок 44 - График зависимости ускорения от массы при $F = 2356 \text{ Н}$

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность проектирования для военной 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. [33]

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.

Областью применения является военная отрасль (самонаводящееся оружие), а так же производители различной радиотехники.

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Цель данной работы – получить готовый продукт, а конкретно многокоординатный прецизионный позиционер на базе сервоприводов.

К задачам работы относится – поэтапная разработка конструкторской документации, технической документация и сборка изделия.

Поскольку данное изделие будет имитировать полунатурные испытания данный проект востребован востребован военно-промышленным комплексом. Также данный продукт будет интересен компаниям, которые занимаются радиоантенными измерениями.

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 (услуга). Сегментируем рынок двигателей по следующим критериям: отрасль применения, вид электропривода (таблица 14).

Таблица 14 – Карта сегментирования рынка позиционеров

	Позиционер на базе сервоприводов	Позиционер на базе шаговых приводов	Позиционер на базе асинхронных приводов
Проектирование и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			
Позиционер фирмы Acutronic		Позиционер фирмы Inncо	

На основании показанной карты, можно сделать вывод, что целевым сегментом рынка является позиционер на базе сервоприводов.

6.2 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 многокоординатных прецизионных позиционеров на базе сервоприводов, чтобы наиболее обосновано выбрать установку для дальнейшего проектирования. Наиболее часто 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 позиционеров:

- Позиционер на базе сервоприводов;
- Позиционер на базе шаговых приводов;
- Позиционер на базе асинхронных приводов.

Сравнение характеристик выбранных типов позиционеров представлено в оценочной карте (таблица 15).

Таблица 15 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Серво	ШД	АД	Серво	ШД	АД
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							

Продолжение таблицы 15

1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
2. Удобство эксплуатации	0,12	5	4	5	0,6	0,48	0,6
3. Помехоустойчивость	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
4. Энергоэкономичность	0,11	5	3	4	0,55	0,33	0,44
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	0,01	5	5	4	0,05	0,05	0,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	5	3	3	0,1	0,06	0,06
9. Функциональная мощность	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
10. Простота эксплуатации	0,04	4	5	2	0,16	0,2	0,08
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
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	0,1	3	4	5	0,3	0,4	0,5

Продолжение таблицы 15

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				4,84	3,83	4,42

Для проведения данного анализа сравнения проводится с двумя распространенными многокоординатными позиционерами:

- 1) Позиционер фирмы Acutronic;
- 2) Позиционер фирмы Inncso.

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:

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

Расчет конкурентоспособности по всем техническим критериям оценки:

$$K(\text{Серво}) = 0,35 + 0,6 + 0,12 + 0,55 + 0,3 + 0,09 + 0,05 + 0,1 + 0,2 + 0,16 + 0,25 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,3 + 0,35 + 0,15 + 0,25 + 0,12 + 0,12 = 4,76$$

$$K(\text{ШД}) = 0,21 + 0,48 + 0,15 + 0,33 + 0,3 + 0,09 + 0,05 + 0,06 + 0,16 + 0,2 + 0,15 + 0,18 + 0,12 + 0,16 + 0,4 + 0,28 + 0,12 + 0,15 + 0,12 + 0,12 = 3,83$$

$$K(\text{АД}) = 0,28 + 0,6 + 0,12 + 0,44 + 0,24 + 0,09 + 0,4 + 0,06 + 0,16 + 0,08 + 0,15 + 0,18 + 0,16 + 0,2 + 0,5 + 0,14 + 0,09 + 0,15 + 0,15 + 0,16 = 4,35$$

В ходе результата анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод, что наибольшим преимуществом обладают многокоординатные позиционеры на базе сервоприводов, так как превосходит конкурентов по производительности, качеству регулирования, простоте настройки и обслуживания, точности позиционирования и долговечности комплектующих.

6.3 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 многокоординатный прецизионный позиционер на базе сервоприводов.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом (таблица 16).

Таблица 16 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Синхронный линейный двигатель	1	Приводит в движение исполнительный механизм	X		
Сервоусилитель	1	Производит поддержание необходимой скорости и момента двигателя согласно техпроцессу, а также выполняет частично функцию контроллера движения.	X		
Рабочий орган	1	Обеспечение позиционирование антенного оборудования, необходимого для измерений	X		

Продолжение таблицы 16

Блок концевых выключателей и датчики положения	1	Сигнализирует о текущей позиции рабочего органа, отключает питание при достижении концевых положений			X
Ручной механизм подачи изделия	1	Обеспечивает подачу исследуемого изделия на мачту			X
Персональный компьютер	1	Служит непосредственно для работы оператора с измерительным оборудованием		X	

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 17).

Таблица 17 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	<	>	>	>	>
Функция 2	>	=	>	>	>	>
Функция 3	<	<	=	>	>	>
Функция 4	<	<	<	=	=	<
Функция 5	<	<	<	>	=	<
Функция 6	<	<	=	>	>	=

На втором этапе преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 18).

Таблица 18 – Матрица количественных соотношений функций

	Функ ция 1	Функци я 2	Функц ия 3	Функци я 4	Функци я 5	Функци я 6	ИТО ГО
Функция 1	1	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 2	1,5	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 4	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	4,0
Функция 5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	0,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	1	1,5	1,5	1	6,0
							$\Sigma = 37$

Стадия 4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования. С помощью применения нормативного метода оценим уровень затрат на выполнение каждой функции (таблица 19).

Таблица 19 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наим-е детали (узла, процесса)	Кол ичес тво дета лей на узел	Выполняемая функция	Нор- ма рас- хода, кг	Трудовое мкость детали, нормо- ч	Стои- мость мате- риала, руб.	Зара- ботна я плата , руб.	Себес тои- мость, руб.
Синхрон ный линейный двигатель	1	Приводит в движение исполнительный механизм	-	2,0	5023, 0	1050, 0	6073,0

Продолжение таблицы 19

Сервоусилитель	1	Производит поддержание необходимой скорости и момента двигателя согласно техпроцессу, а также выполняет частично функцию контроллера движения.	-	2,5	8945,2	1500,5	8045,2
Рабочий орган	1	Обеспечение позиционирование антенного оборудования, необходимого для измерений	-	1,0	453,0	210,5	1663,5
Блок концевых выключателей и датчики положения	1	Сигнализирует о текущей позиции рабочего органа, отключает питание при достижении концевых положений	-	0,5	213,5	105,0	818,5
Ручной механизм подачи изделия	1	Обеспечивает подачу исследуемого изделия на мачту	-	1,0	1437,2	640,4	2077,6
Персональный компьютер	1	Служит непосредственно для работы оператора с измерительным оборудованием	-	2,0	10234,7	1800,6	12035,3

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ. Отообразим информацию об объекте исследования в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 45).

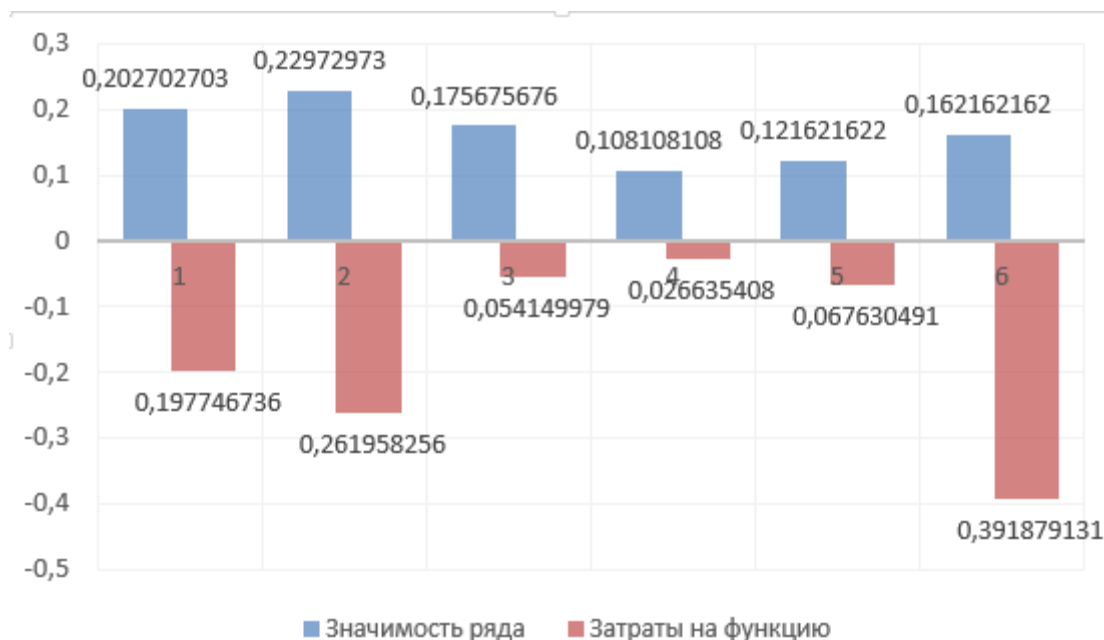


Рисунок 45 – Функционально-стоимостная диаграмма

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, 2, 6. 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;
- повышение ремонтпригодности;
- применение новых техпроцессов, заготовок, материалов и т.д.

6.4 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 46.

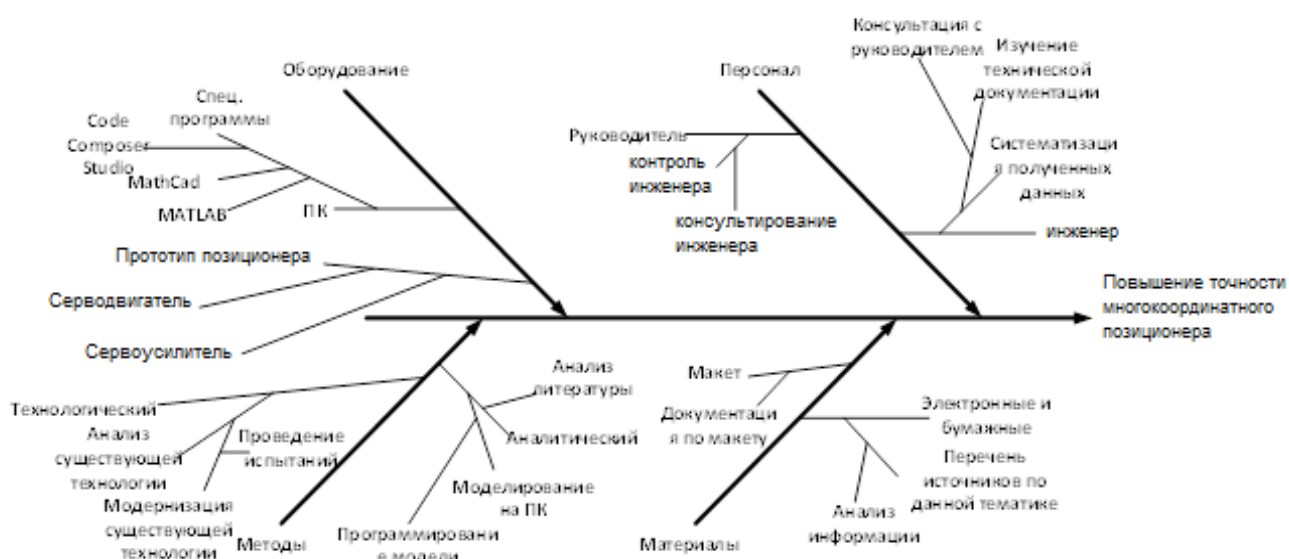


Рисунок 46 – Причинно-следственная диаграмма

6.5 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. Отобразим матрицу SWOT в таблице 20.

Таблица 20 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями С4.Повышение производительности труда. С5. Квалифицированный персонал. С6. Высокий срок эксплуатации. С7.Надежность данной системы сравнению с другими. С8. Высокое качество продукции. С9. Универсальность схемы управления</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл2. Большой срок выхода на рынок Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения</p>
<p>Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли</p>	<p>В1; С2; С5; С7; С8; С9; В2; С1; С2; С3; С4; С6; С7; С8; С9; В3; С1; С3; С4; С6; С7; С9; В4; С1; С5; С6; С7; С8; С9; В5; С1; С3; С4; С5; С6; С7; С8; С9.</p>	<p>В2; Сл2; В5; Сл1; Сл3.</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос. У5. Появление новых конкурентных разработок.</p>	<p>У1; С5; У2; С1; С2; У3; С1; С2; С3; С6; У5; С1; С5.</p>	<p>У1; Сл1; Сл3; У2; Сл3; У3; Сл1; Сл2; Сл3; У4; Сл1; Сл3; У5; 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 21). 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 21 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – возможности»

	Сильные стороны проекта									
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Возможност и проекта	B1	0	+	0	0	+	0	+	+	+
	B2	+	+	+	+	-	+	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	+	+	0	+
	B4	+	-	-	0	+	+	+	+	+
	B5	+	0	+	+	+	+	+	+	+

Результат анализа таблицы:

- B1C2C5C7C8C9;
- B2C1C2C3C4C6C7C8C9;
- B3C1C3C4C6C7C9;
- B4C1C5C6C7C8C9;
- B5C1C3C4C5C6C7C8C9.

Также, представим в таблице 22 интерактивную матрицу проекта «Сильные стороны – угрозы».

Таблица 22 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – угрозы»

	Сильные стороны проекта									
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Угрозы	У1	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	У2	+	+	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 22

	У3	+	0	+	+	-	+	0	0	0
	У4	-	-	-	0	0	-	-	-	-
	У5	+	-	-	-	+	-	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

- У1С5;
- У2С1С2;
- У3С1С3С6;
- У5С1С5.

В таблице 23, 24 отразим слабые стороны, их возможности и угрозы.

Таблица 23 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – возможности»

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности	В1	-	-	-
	В2	-	+	-
	В3	-	-	-
	В4	-	-	0
	В5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

- В2Сл2;
- В5Сл1Сл3.

Таблица 24 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – угрозы»

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

Результаты анализа таблицы:

- У1Сл1Сл3;
- У2Сл3;
- У3Сл1Сл2Сл3;
- У4Сл1Сл3;
- У5Сл1Сл3.

В рамках **третьего этапа** должен быть подведен итог SWOT-анализа, в котором будут отражены стратегические планы на реализацию проекта и долгосрочное развитие. По результатам второго этапа выделим основные задачи:

- Внедрение автоматической системы сигнализации повреждения оборудования;
- Внедрение новых технологий обнаружения неисправностей;
- Внедрение нескольких источников поставки частей и материалов;
- Обеспечение подготовки квалифицированных кадров, и благоприятные условия труда для них.

В результате анализа было установлено, что технический проект имеет такие важные преимущества как высокая энергоэффективность, повышенная безопасность производства, которые обеспечивают высокую производительность и экономичность технологического процесса. Несмотря на это, имеет место быть сложность ремонта отдельных частей оборудования, которая приводит к большим затратам на поставку этих частей с заводов, что в свою очередь сопровождается большими затратами в целом.

Главными факторами, влияющими на функциональную и бесперебойную работу оборудования, являются поставка материалов и обнаружение повреждений оборудования на начальных стадиях, когда замена частей агрегатов или ремонт не составляет значительных затрат.

6.6 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. Отобразим бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации в таблице 25.

Таблица 25 – 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	4	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	3	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	2
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1

Продолжение таблицы 25

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	4	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
ИТОГО БАЛЛОВ		48	44

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 48, можно судить о том, что проект имеет перспективность выше среднего, а по уровню имеющихся знаний у разработчика проект имеет среднюю перспективность, поскольку суммарный балл составил 44.

6.7 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.

6.8 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 26), иерархии целей проекта и критериях достижения целей (таблица 27).

Таблица 26 – 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 27 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка многокоординатного позиционера на базе сервоприводов
Ожидаемые результаты проекта:	Готовый продукт (собранный и запущенный изделие)

Продолжение таблицы 27

Критерии приемки результата проекта:	Соответствие требованиям технического задания заказчика
Требования к результату проекта:	Требование:
	Максимальная скорость движения линейных осей не менее 5 м/с.
	Максимальное ускорение движения линейных осей не менее 20 м/с ²
	Точность позиционирования не хуже 0,005 мм
	Полоса рабочих частот не менее 1 Гц
	Наличие ПО для работы с изделием

2 Организационная структура проекта. Перечислим в таблице 28 рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, функции и трудозатраты в проекте.

Таблица 28 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Каракулов Александр Сергеевич	Руководитель	Контроль за реализацией проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координатор деятельности по проекту	1776
2	Фоменко Евгений Александрович	Инженер	Специалист, выполняющий работы по проекту	2136
ИТОГО:				3912

Таблица 29 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/Допущения
2.1. Бюджет проекта	365000 рублей
2.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
2.2. Сроки проекта:	400 дней со дня утверждения плана управления проектом
2.2.1 Дата утверждения плана управления проектом	09.02.2019
2.2.2. Дата завершения проекта	24.04.2020
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)

6.9 Планирование управления научно-техническим проектом

6.9.1 Иерархическая структура работ проекта

Представим иерархическую структуру работ проекта на рисунке 47.

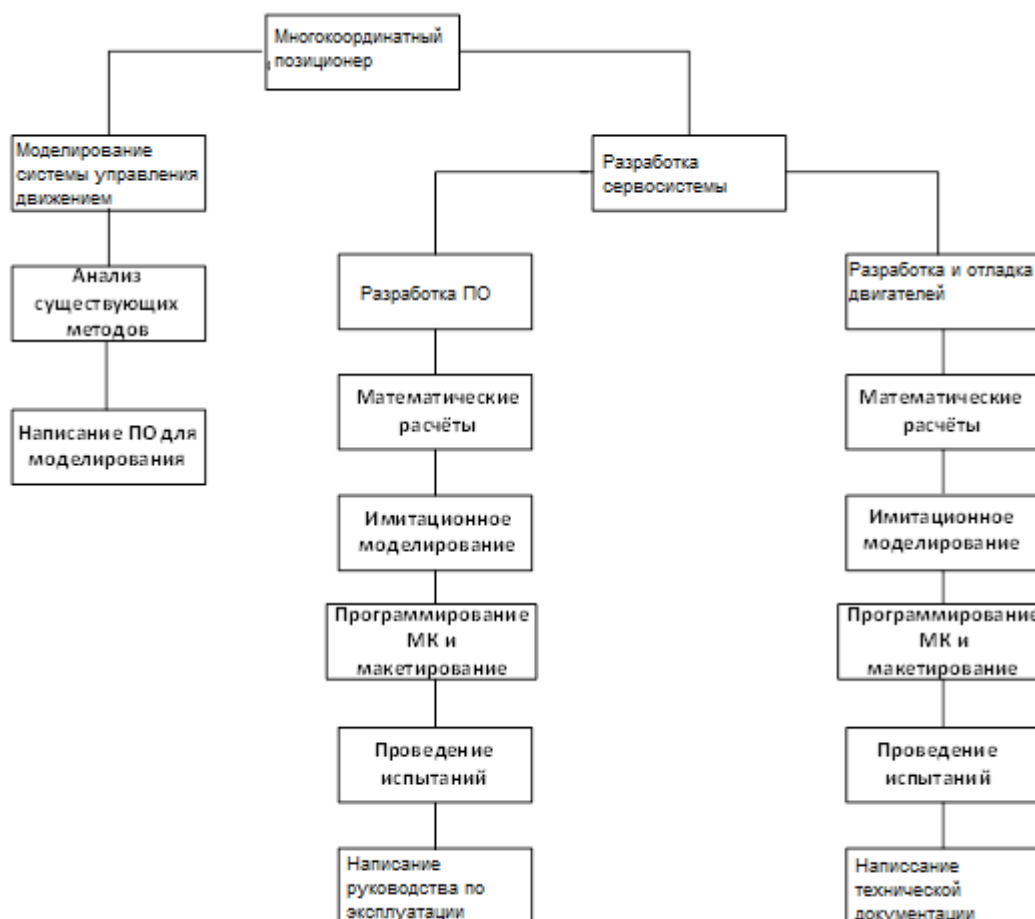


Рисунок 47 – Иерархическая структура работ проекта

6.9.2 Контрольные события проекта

Определим ключевые события проекта, их даты и результаты в таблице

30.

Таблица 30 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Разработка программы в среде MATLAB для моделирования динамики передвижения ИО	20.02.2019	Документ в формате Word
2	Разработка модели системы управления движением	01.04.2019	Документ в формате Word
3	Разработка и отладка двигателей	06.09.2019	Техническая документация
4	Разработка ПО для организации синхронного позиционирования	10.01.2020	Проект Visual Studio

6.9.3 План проекта

Для выполнения целесообразного и рационального планирования, необходимо разработать календарный план, который включает в себя основные этапы разработки и создания проекта (таблица 31).

Таблица 31 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Выбор направления исследования	1	8.02.19	8.02.19	Фоменко Е.А.
2	Составление технического задания	1	9.02.19	9.02.19	Каракулов А.С., Фоменко Е.А.
3	Изучение литературы	9	10.02.19	19.02.19	Фоменко Е.А..
4	Разработка модели системы управления движением	158	01.04.19	05.09.2019	Каракулов А.С., Фоменко Е.А.
5	Разработка и отладка двигателей	126	06.09.19	09.01.2020	Каракулов А.С., Фоменко Е.А..
6	Разработка ПО для организации синхронного позиционирования	105	10.01.20	23.04.2020	Фоменко Е.А.
Итого:		400			

Для предоставления календарного плана более наглядным образом, используем диаграмму Ганта, которая применяется для иллюстрации графика или плана работ проектов (таблица 32).

Таблица 32 – Диаграмма Ганта

Код работы	Кол-во дней	Исп.	Дни					
			1	2	11	169	295	400
1	1	1	■					
2	1	2		■				
3	9	1			■			
4	158	2				■		
5	126	2					■	
6	105	2						■

■ - инженер, ■ - руководитель

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

6.9.4 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.

6.10 Материальные расходы

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

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi},$$

(3)

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхi}$ – 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 33.

Таблица 33 – Материальные затраты на выполнение научного исследования

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_m), руб.
Бумага для принтера	упаковка	1	300	300
Ручка	штук	3	12	36

Продолжение таблицы 33

Брошюровка	штук	1	25	25
USB накопитель	штук	1	450	450
Калькулятор	штук	1	250	250
Линейка	штук	1	30	30
Распечатка файлов	лист	200	2	400
Мультифора	штук	3	2	6
Итого:				1497

Таким образом материальные затраты на выполнение данного научно-технического исследования составляют 1497 рублей.

6.10.1 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.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис.}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор}$$

(4)

где $T_{ис.}$ - время использования оборудования = 116 дней;

$T_{г}$ - количество использования в год = 365 дней;

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

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

Пример расчета:

$$I_{ам} = \frac{116}{365} \cdot \frac{1}{3} \cdot 45000 = 4767,124$$

6.10.2 Основная заработная плата

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

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 9404 + 1880,8 = 11284,8 \text{ руб} \quad (8) \quad (5)$$

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:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 2351 \cdot 4 = 9404 \text{ руб} \quad (9) \quad (6)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

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

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{237} = \frac{53594 \cdot 10,4}{237} = 2351 \text{ руб}, \quad (7)$$

где Z_m – 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 34).

Таблица 34 – 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

Продолжение таблицы 34

Потери рабочего времени		
- Отпуск	48	48
- Больничный	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад сотрудника (руководитель):

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 53594 \text{ руб}$$

(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 35.

Таблица 35 – Расчёт заработной платы

Исполнители	Z_{mc} , руб.	k_{np}	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	27484	0,3	0,2	1,3	53594	2351	16	4514	37616
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	94	17365,2	144685
Итого									182301

6.10.3 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 $k_{\text{доп}}$ по формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (10) \quad (9)$$

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

Расчет:

$$Z_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 37616 = 4514 \text{ руб (для руководителя),}$$

$$Z_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 144685 = 17365,2 \text{ руб (для инженера)}$$

6.10.4 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:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (11) \quad (10)$$

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

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (37616 + 4514) = 12639 \text{ руб (руковод.)}$$

$$Z_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (144685 + 17365,2) = 48615,06 \text{ руб (инж.)}$$

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

На 2020 г. размер страховых взносов равен 30% (таблица 36).

Таблица 36 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная зп, руб.	Дополнительная зп, руб.
Руководитель проекта	37616	4514
Инженер	144685	48615,06
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого		
Руководитель	12639	
Инженер	48615	

6.10.5 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты, которые не попали в предыдущие статьи расходов. К ним относят: оплата электроэнергии, услуги связи, печать и ксерокопирование материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = (Z_m + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб} + A) \cdot k_{нр} \quad (12) \quad (11)$$

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

Расчет:

$$Z_{накл} = (1497 + 182301 + 21879,2 + 61254,06 + 4767,124) \cdot 0,16 = 43471,74 \text{ руб.}$$

6.10.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчитанная 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 37.

Таблица 37 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
Материальные расходы	1497	0,4%
Амортизация	4767,124	1,5%
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	182301	58,2%
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	21876	7%
Отчисления во внебюджетные фонды	61254	19,5%
Накладные расходы	41521	13,2%
Бюджет затрат НТИ	313216,124	100

6.10.7 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта сформируем матрицу ответственности (таблица 38).

Таблица 38– Матрица ответственности

Этапы проекта	Магистрант	Руководитель
Выбор направления исследования	*	
Составление технического задания	*	*
Изучение литературы	*	
Разработка модели системы управления движением	*	*
Разработка и отладка двигателей	*	*
Разработка ПО для организации синхронного позиционирования	*	*

6.11 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 позиционера были приняты равными 35000 рублей.

На основании таблицы 6, стоимость комплектующих варианта исполнения текущей разработки равна 26306,4 рублей. Итоговая стоимость данного варианта исполнения составляет 339522,524 рубля, включая бюджет затрат НТИ (таблица 37).

Аналог разрабатываемого привода на шаговых двигателях применяется в основном в системах ЧПУ станков. Он отличается от разрабатываемого проекта на синхронных двигателях дороговизной, неудобством управления и сравнительно низкой точностью.

Исходя из таблицы 19, за изменением синхронного двигателя и сервоусилителя на шаговый двигатель и драйвер шагового двигателя, их цены равны соответственно 9437,7 рублей и 12330 рублей. Стоимость варианта исполнения аналога на шаговых двигателях составляет 34106 рублей. Итоговая стоимость данного варианта исполнения составляет 347322,124 рубля, включая бюджет затрат НТИ (таблица 37).

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{339522,524}{365000} = 0,93$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{347322,124}{365000} = 0,951$$

Следовательно, исходя из этого, можно сделать вывод, что интегральный показатель разработки текущего проекта показывает удешевление стоимости разработки в 0,93 раз (около 7%), а интегральный показатель разработки аналога на шаговых двигателях показывает удешевление стоимости разработки в 0,951 раз (около 4,9%), т.е. удорожание на 2,1% относительно стоимости разрабатываемого электропривода на синхронных двигателях.

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 по проектированию многокоординатного прецизионного позиционера на базе сервоприводов рекомендуется рассмотреть следующие критерии:

Надежность многокоординатного позиционера на базе сервоприводов— это длительный эксплуатационный ресурс (в частности, в условиях атмосферы с содержанием агрессивных реагентов, не стабильным напряжением и высокой влажностью). Надежность повышает исполнение всех деталей оборудования во взрывозащищенном и влагостойком корпусе, электроснабжения обеспечивается дополнительным резервным питанием, что в свою очередь позволяет обеспечить безаварийность и бесперебойность в работе

Энергосбережение электропривода многокоординатного позиционера — это экономия электрической энергии. Энергосбережение достигается за счет оптимального подбора мощности электродвигателей, использование частотно-регулируемого привода.

Точность позиционирования электропривода позиционера – это показатель, который отражает ошибку установки в положение.

Производительность многокоординатного позиционера – должен обеспечиваться быстрый разгон, поддержание высокой скорости, точное позиционирование при данных ускорениях.

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

Производительности труда – это показатель, характеризующий результативность труда, обеспечивается в проекте благодаря автоматизации, но при этом капиталовложения возрастают. Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 39.

Таблица 39 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Электропривод од позиционера на базе сервоприводов	Электропривод од позиционера на базе шаговых двигателей	Электропривод од позиционера на базе асинхронных двигателей
Безопасность	0,25	5	5	5
Удобство в эксплуатации	0,10	4	5	5
Производительность	0,10	5	4	3
Энергосбережение	0,15	5	4	5
Надежность	0,25	5	4	4
Точность	0,15	5	4	3
Итого:	1.00	4,9	4,66	4,5

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{m} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 4 + 0,10 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,9$$

$$I_{\text{аналог}1} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,10 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 4,66$$

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

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

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{4,9}{0,93} = 5,269$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\Phi}^a} = \frac{4,35}{0,951} = 4,57$$

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;

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

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{5,269}{4,57} = 1,152$$

Отразим сравнительную эффективность разработки в таблице 40.

Таблица 40 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,951	0,93
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,66	4,91

Продолжение таблицы 40

3	Интегральный показатель эффективности	4,9	5,269
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,152	

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 другими конкурентоспособными электроприводами многокоординатными позиционерами. 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 400 дней, из которых 222 рабочих дня у руководителя и 267 дня у инженера.

Произведен расчет бюджета НИИ равный 323216,124 руб, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников, отчисления внебюджетные фонды.

В результате эксплуатации выбранного электропривода многокоординатного прецизионного позиционера на базе сервоприводов повышается эффективность работы за счет уменьшения общего расхода на оборудование, экономия электроэнергии, повышения надежности и ресурсоэффективности позиционера.

7 Социальная ответственность

Целью данного раздела является обеспечение безопасности, соблюдение экологических норм в здании, в котором расположена система управления сервоприводом многокоординатным позиционером. Будет рассматриваться обеспечение необходимых условий труда в лаборатории 253 8-го корпуса НИ ТПУ. Площадь рабочего помещения составляет 50 м^2 (длина $A = 8,5 \text{ м}$, ширина $B = 5,8 \text{ м}$), объем составляет 148 м^3 (высота $C = 3 \text{ м}$). Помещение рассчитано на 8 человек, на каждое одно рабочее место приходится в среднем 6 м^2 общей площади и $20,5 \text{ м}^3$ объема. По санитарным нормативам на одного человека приходится 6 м^2 площади и 24 м^3 объема. В помещении расположено 3 многофункциональных рабочих стенда для проведения лабораторных испытаний, два ПК 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 двумя 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.

7.1 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. Компоновка рабочего места представлена на рисунке 47.



Рисунок 47 – Структурна схема компоновки лабораторного комплекса

Эргономическими аспектами проектирования видеотерминальных 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

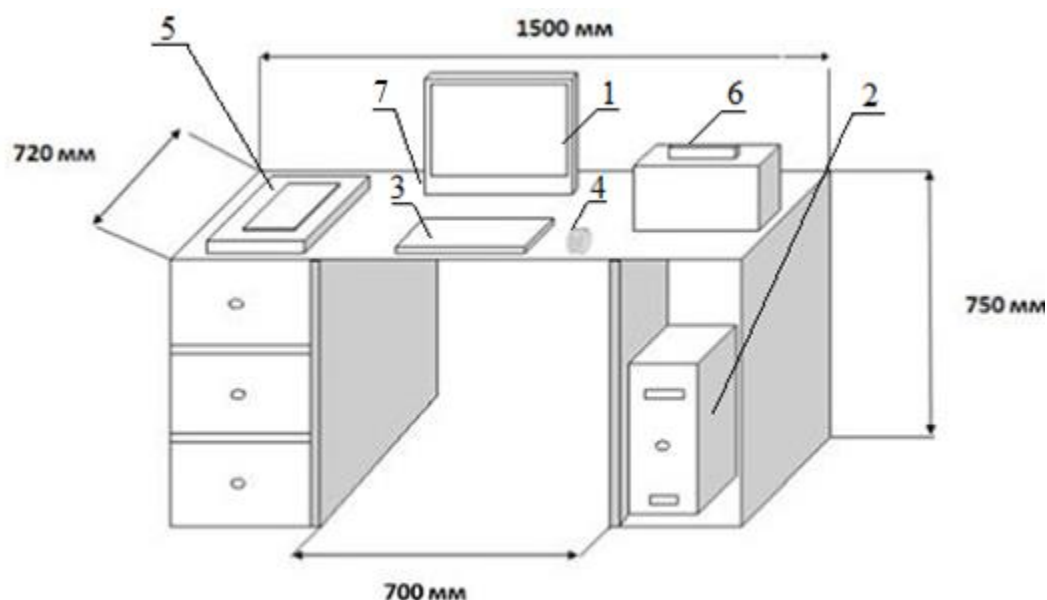


Рисунок 49 – Размещение основных и периферийных составляющих рабочего места

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 программист мог удобно сидеть, не был вынужден поджимать ноги;
- Поверхность стола должна обладать свойствами, исключающими появление бликов в поле зрения программиста;
- Конструкция стола должна предусматривать наличие выдвижных ящиков (не менее 3 для хранения документации, листингов, канцелярских принадлежностей);
- Высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680- 760мм. Высота поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть около 650мм.

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 200 ниже горизонтали к центру экрана, причем экран перпендикулярен этому направлению.

Должна также предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от -100 до +200 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 видеотерминала следующие:

- голова не должна быть наклонена более чем на 200;
- плечи должны быть расслаблены;
- локти - под углом 800...1000.

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 50.

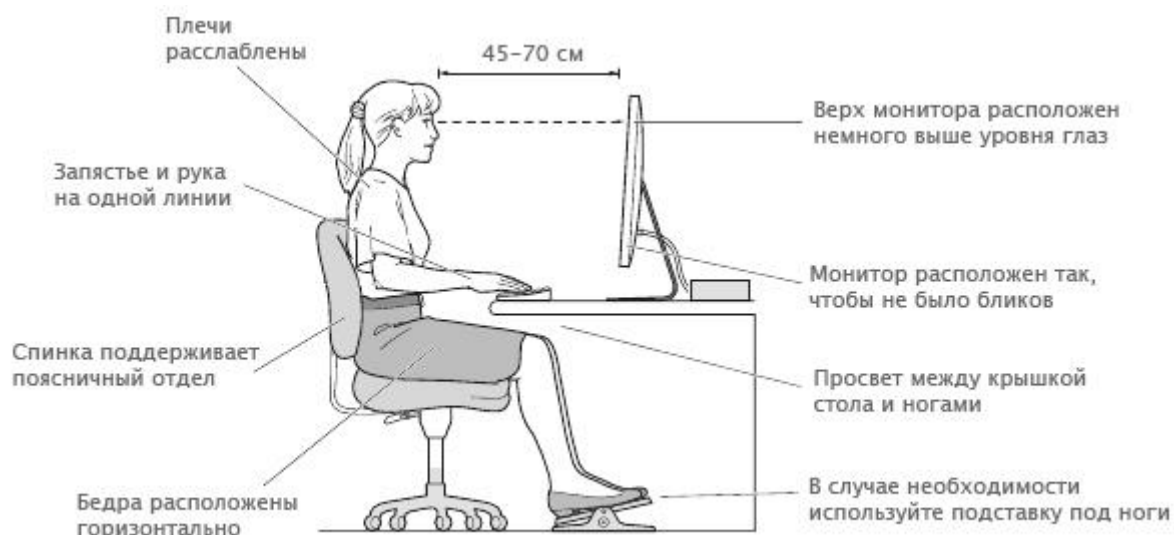


Рисунок 50 – Пример правильного расположения работника за ПК

7.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при исследовании частотно-регулируемого электропривода. В таблице №41 представлены возможные вредные и опасные факторы, согласно нормативным документам.

Таблица 41 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо	Изготов	Эксплуа	
1. Высокие уровни шума		+	+	Требования к параметрам шума устанавливает СП 51.13330.2011; ГОСТ 12.1.012-90;
2. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ 12.1 005-88; СанПиН 2.4.2.2821-10
3. Сильные вибрации		+	+	Производственная вибрация устанавливается СН 2.2.4/2.1.8.566–96;

Продолжение таблицы 41

4. Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение; СНиП 23-05-95
5. 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.

7.3 Описание технологического процесса и рабочего места

Технологический процесс разработки и проверки система управления сервоприводом многокоординатного прецизионного позиционера заключается в следующем:

- Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике.
- Компьютерное моделирование системы управления.
- Анализ полученных результатов моделирования.
- Проверка разрабатываемой системы управления на реальном двигателе.
- Анализ полученных результатов проверки.

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- Исследуемый синхронный двигатель с постоянными магнитами;
- Шкаф системы управления;
- Преобразователь частоты;
- Пользовательский компьютер;
- Монитор.

7.4 Анализ опасных производственных факторов и образование мероприятий по их устранению

Опасными производственными факторами при системе управления электроприводом многокоординатного прецизионного позиционера: [34]

- Поражения электрическим током;
- Двигающиеся элементы электропривода;
- Опасность загорания (пожара);

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.

При эксплуатации механизмов перемещения необходимо учитывать наличие и возможность воздействия следующих вредных факторов: [35]

- Повышенный уровень шума и вибрации;
- Повышенной запыленности и влажности в лаборатории где производится исследование;
- Недостаточной освещенности;
- Пониженной температуры воздуха в лаборатории.

Не допускается применение в организациях вредных веществ, материалов, продукции, товаров, а также оказание услуг, для которых не разработаны методики и средства метрологического контроля, токсикологическая (санитарно-гигиеническая, медико-биологическая) оценка которых не проводилась.

7.4.1 Шум и вибрации

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источниками звуков и шумов являются вибрирующие тела. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Люди, работающие в условиях шума, более быстро утомляются, жалуются на головные боли. Повышается давление крови, учащается или замедляется ритм сердечных сокращений, могут возникать различные заболевания нервной системы (неврастения, неврозы, расстройство чувствительности).

Источником шума и вибрации в лаборатории являются испытательные асинхронные двигатели, двигатели постоянного тока, синхронные машины, установленные на лабораторных стендах.

Допустимый уровень шума на рабочих местах составляет 80 дБА.

Для защиты от шума по СанПиН [2.2.4/2.1.8.562 – 96] и вибрации по СанПиН [2.2.4/2.1.8.566 – 96]

предусматриваются:

- Обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89, в качестве СИЗ Государственным стандартом

предусмотрены заглушки–вкладыши "Беруши", заглушающая способность которых составляет 6–8 дБА;

- Установка звукоизолирующих кабин, кожухов;
- Устанавливаются виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы, которые гасят вибрации).

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука и звукового давления на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 42 [36].

Таблица 42 – Допустимые уровни звукового давления

Помещения, рабочие места	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивале нтные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения для инженерно- технического персонала цехов и служб	79	70	68	58	55	52	50	49	60
Помещения для размещения шумного оборудования	94	87	82	78	75	73	71	70	80
Мастерские механические и по ремонту оборудования с собственными источниками шума	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Продолжение таблицы 42

Комнаты мастеров механической мастерской, мастеров по ремонту оборудования	8 3	74	68	63	60	57	55	54	65
--	--------	----	----	----	----	----	----	----	----

Допустимые величины вибрации в лаборатории представлены в таблице 43 [37].

Таблица 43 – Допустимые величины вибрации

Амплитуда колебаний вибрации, мм	Частота вибрации, Гц	Скорость колебательных движений, см/с	Ускорение колебательных движений, см/с ²
0,6-0,4	До 3	1,12-0,76	22-14
0,4-0,15	3-5	0,76-0,46	14-15
0,15-0,05	5-8	0,46-0,25	15-13
0,05-0,03	8-15	0,25-0,28	13-27
0,03-0,009	15-30	0,28-0,17	27-32
0,009-0,007	30-50	0,17-0,22	32-70
0,007-0,005	50-75	0,22-0,23	70-112
0,005-0,003	75-100	0,23-0,19	112-120

Приведенные нормы одинаковы для горизонтальных и вертикальных вибраций. Для снижения воздействия вибрирующих машин и оборудования на организм человека применяются следующие меры и средства:

- Замена неисправного элемента или полностью оборудования с вибрирующими рабочими органами на невибрирующие в процессах, где это возможно;
- Применение виброизоляции вибрирующих машин относительно основания (например, применение рессор, резиновых прокладок, пружин, амортизаторов);

- Использование дистанционного управления в технологических процессах (например, использование телекоммуникаций для управления транспортером из соседнего помещения).

7.4.2 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.

Научно-исследовательская лаборатория управления электроприводами 253 восьмого корпуса ТПУ является помещением I б категории (таблица - 44), 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 46.

Таблица 44 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Период, Год	Категори я работы	Температура, °С	Относительн ая влажность воздуха,%	Скорост ь движени я воздуха, не более м/с
Холодный и переходный	легкая	20-23	60-40	0, 2
Теплый	легкая	22-25	60-40	0, 2

Для оценки воздействия параметров микроклимата в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания используется ТНС-индекс, нормативные величины которого приведены в таблице 45.

Таблица 45 - 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 46 - 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.

Согласно специальной оценки условий труда в ТПУ микроклимат Научно-исследовательской лаборатории управления электроприводами ТПУ, соответствует допустимым нормам.

7.4.3 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 [38]. 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 47.

Таблица 47 - 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

Продолжение таблицы 47

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.

7.5 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 ОС 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.

7.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации при исследовании многокоординатного прецизионного позиционера на базе сервоприводов: возникновение пожара (загорания) и поражение электрическим током.

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

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного участка. Согласно классификации производств по пожарной опасности рассматриваемая лаборатория относится к классу Б (наличие горючих волокон или пыли рассматриваемого участка): источником взрыва может послужить короткое замыкание или из - за нарушения электроизоляции. Кроме взрывоопасных зон имеется пожароопасная зона класса П-П. Для этих зон используется специальное оборудование во взрывозащищенном или пожара-защищенном исполнении .

Использование электрооборудование во взрыво–пожарозащищенном исполнении – одно из направлений профилактики, другое направление установка систем взрыва и пожарной сигнализации. Такие системы должны быть установлены на объектах, где воздействие опасных факторов взрыва и пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Участок должен быть оснащен такой системой, которая включает систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это

другое направление профилактики загораний. Выбор систем взрывоподавления и пожаротушения для участка требует специального рассмотрения и расчетов.

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 действий 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 253 восьмого корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 48 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	Порошковый серии ОП
До 10,0	Углекислотный серии ОУ

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 49 - Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся в помещении
П – 2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе № 8 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 студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.

На рисунке 51 представлен план эвакуации из лаборатории 253 8 корпуса ТПУ.



Рисунок 51 – План эвакуации из лаборатории 253 8 корпуса ТПУ

»

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на научного сотрудника, 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

В данной работе была разработано и исследовано изделие динамического узла цели. Была разработана система управления линейными синхронными электродвигателями с постоянными магнитами, выбран сервоусилитель, сервоконтроллер (контроллер движения) и вспомогательная аппаратура, разработана схема управления синхронным двигателем в программной среде MatLAB Simulink.

Произведен обзор основных параметров и настроек в сервоусилителе, необходимых для базовой и оптимальной настройки приводов для запуска оборудования, а также получения с помощью них осциллограмм.

Было проверено программное обеспечение для осуществления синхронного многокоординатного движения электроприводов.

Создана программа методик проведения испытаний для проверки соответствия разработанного изделия основным требованиям технического задания, в последствии по которой производились испытания.

Поскольку целью работы была разработка и проверка максимально достижимых динамических характеристик, было произведено реальное моделирование по току, скорости и позиции машины. По результатам испытаний п. 5.3 был сформирован список рекомендаций, которые необходимо применить для достижения соответствия требований технического задания, такие как изменение конструкции вертикальной мачты с целью снижения ее массогабаритных характеристик с изменением типа привода с линейного на вращательные, а также устанавливая на горизонтальную ось дополнительно 2 линейных двигателя на одной картинной плоскости, а также изменение технического задания для увеличения максимально разрешенной потребляемой мощности ДУЦ, при невозможности исправления данного пункта технического задания по конструктивным соображениям, то необходимо снижать требуемые параметры скорости и ускорения до приемлемых.

В экономической части выпускной квалификационной работы исследованы вопросы планирования, определение ресурсной

(ресурсосберегающей), бюджетной, финансовой, социальной и экономической эффективности научно-технического исследования, расчет материальных 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 использованной литературы

1. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. — 6-е изд. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.
2. Москаленко, В.В. Электрический привод. — 2-е изд. — М.: Академия, 2007. — ISBN 978-5-7695-2998-6.
3. В.В. Маскаленко, Электрические двигатели специального назначения, - М.: Энергоиздат, 1981.
4. Патент Динамический узел имитации цели с двухступенным устройством доворота. Безмельницын Александр Николаевич, Бороданов Андрей Александрович, Калинин Антон Александрович, Кучеба Андрей Викторович, Лысиков Юрий Семенович, 2018. https://yandex.ru/patents/doc/RU184323U1_2018 (Дата обращения 19.03.2020г.)
5. Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. Учебное пособие - М.: Академия, 2006.-368с.
6. Каталог линейных двигателей Ruchservomotor LP32. https://www.ruchservomotor.com/html/LP32_ru.htm (Дата обращения 2.04.2020г.)
7. Технические характеристики сервоусилителя S700 <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/drives/servo/s700/> (Дата обращения 2.04.2020г.)
8. Технические характеристики сервоконтроллера движения РСММ. <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/machine-controls/controller-hardware/standalone/pcmm/> (Дата обращения 2.04.2020г.)
9. Технические характеристики датчика положения LM10 Renishaw. <https://www.renishaw.ru/ru/lm10-linear-magnetic-encoder-system--9226> (Дата обращения 3.04.2020г.)
10. С.Пируг: «Энергоэлектроника». Краков. Издательство Горно-металлургической Академии, 2006.

11. П.Зентэк «Влияние выходных параметров инверторов ШИМ и кабеля питания на паразитные явления в индукционных двигателях». ZP-ME №: 71, 2005.
12. Технические характеристики моторных дросселей 3YL. <https://www.kollmorgen.com/en-us/developer-network/motor-choke/> (Дата обращения 6.04.2020г.)
13. Назаров А.И., Электрическое оборудование для подземных работ, Методическое пособие по изучению конструкции и электрических схем, Кировск, ХТК, 2013, 55 с.
14. Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. и др. Источники электропитания радио- и электронной аппаратуры: Справочник. Под ред. Г.С. Найвельта. М.: Радио и связь, 1986.
15. Назаров А.И. Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий, Кировск, 2006, 286 с.
16. Linear Motor System Technical Information. https://servosystem.ru/files/content/servo/servo_hiwin/linear_motor_hiwin.pdf (Дата обращения 15.04.2020г.)
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. - М. Академия, 2005. - 304с.
18. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 368 с
19. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems. – Питер, 2008. – 288 с.
20. Зайцев А. Н. Разработка математической модели привода с линейным синхронным двигателем для исследования переходных режимов / А. Н. Зайцев, В. Э. Воскобойник, С. В. Комаров и др. / 2004. – 240 с.
21. А.Д. Подольцев, Р.П. Бондарь, Моделирование работы трехфазного линейного синхронного двигателя колебательного движения в пакете Matlab/Simulink, 2005.

22. А.Н. Зайцев, В.Э. Воскобойник, С.В. Комаров, А.С. Ворошилов Исследование математической модели привода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах, 2006.
23. Линейный синхронный электропривод транспортных средств на магнитном подвесе: Отчет о НИР (итоговый) / Институт транспортных систем и технологий (ИТСТ) НАН Украины "Трансмаг". – № гос.рег. 0194U022246 – Т.2 – Д.: ИТСТ, 1995. – 130 с.
24. Онлайн-помощник утилиты DriveGUI. <http://www.wiki-kollmorgen.eu/wiki/DanMoBilder/file/s300700help/default.htm> (Дата обращения 21.04.2020г.)
25. Башарин А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
26. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
27. Васильев Д. В. Проектирование и расчёт следящих систем / Д. В. Васильев, Б. А. Митрофанов, Г. Л. Рабкин. – Л.: Судостроение, 1964. – 357 с.
28. AKD Online tuning guide. <https://www.kollmorgen.com/en-us/developer-network/akd-online-tuning-guide/> (Дата обращения 23.04.2020г.)
29. KAS IDE PDMM and PCMM webserver user manual. <https://www.kollmorgen.com/en-us/developer-network/kas-ide-pdmm-and-pcmm-webserver-user-manual-en-rev-fpdf/> (Дата обращения 28.04.2020г.)
30. Джон Скит. С# для профессионалов: тонкости программирования, 3-е издание, новый перевод = C# in Depth, 3rd ed.. — М.: «Вильямс», 2014. — 608 с.
31. Голота Я.Я. и др. Автоматизация контроля технологических процессов (логикоантонимический подход) / Голота Я.Я., Колосова О.В., Тисенко В.Н., Чурсина А.Ю. // Измерительная техника. 1991. - №9. - С. 8-10.

32. А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. — 6-е изд., перераб. и доп.. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
33. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019.
34. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015.
35. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003 .
36. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003.
37. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003.
38. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011

Приложение I

(справочное)

Development of a multi-axis slider system for precision positioning

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Фоменко Евгений Александрович		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качалов Н.А.	к.п.н		

ABSTRACT

Development of a multi-axis slider system for precision positioning

Following the recent improvements in precision engineering-related technology, interests in micro/nano-engineering applications are increased and various micro/nano-scale operations and products are developed. For micro/nano-scale applications, high-precision equipment including micro/nano-positioning devices with high accuracy and precision are required. In this thesis, the mechatronic design of a three axes micro/nano-positioning device is discussed in detail. In order to satisfy nanometer-level precision, an adaptive method to increase the available measurement resolution of quadrature encoders is presented. Performance characteristics of micro/nano-positioning devices usually include positioning accuracy of each individual axis, operation range, maximum velocity and maximum acceleration. For this reason, permanent magnet linear motors (PMLM) are chosen as actuators in the presented design due to their outstanding characteristics. Moreover, in order to provide high flexibility in terms of applications and simplify the control of the system, modularity is one of the main concerns while designing the micro/nano-positioning system presented here. Building the modular single-axis slider system, three axes positioning devices are constructed by assembling three of them perpendicularly. In this design, linear optical encoders are used as feedback sensors. The movement range of the designed system is 120 mm in each direction. Since the available linear optical encoders have a measurement resolution of 1 μm , resolution of them is to be improved with software for sub-micron level positioning applications. For this purpose, a new method to increase the available measurement resolution of quadrature encoders is presented in this thesis. This method features an adaptive signal correction phase and an interpolation phase.

Contents

1 Introduction.....	158
2 Background Information	162
2.1 Micro/Nano-Positioning Systems	162
2.2 Encoder Resolution Improvement Methods.....	165
3 Design of Micro/Nano-Positioning Device.....	169
3.1 Modular Single-Axis Slider System.....	169
3.1.1 Components and Control Setup	170
Bibliography	175

Chapter 1

1 Introduction

There is a growing interest in precision positioning systems for various micro/nanotechnology applications [4]. Micro/nanomanufacturing and assembly, optical component alignment systems, scanning microscopy applications, nano-particle placement applications, biotechnology applications and cell/tissue engineering are some examples of the applications that precision positioning devices are commonly used [5, 6, 7]. High precision positioning devices are required for any operations in micro/nanoscale applications. Performance characteristics of these devices depend on positioning accuracy, maximum velocity and acceleration that they can operate with acceptable performance based on the application. These characteristics are mostly determined by the actuator that gives motion to the slider and the feedback sensor that supplies the position information.

Commonly used actuators for micro/nano-positioning systems are piezoelectric actuators [8, 9, 10], ballscrew mechanisms [5, 11] and permanent magnet linear motors (PMLM) [11, 12]. Piezoelectric actuators have the motion range of just tens of micrometers and they are limited in terms of acceleration and velocity capabilities [5]. Also, for a ballscrew mechanism, a ballscrew is coupled to a DC motor to convert the motor rotary motion into linear motion. Thus, ballscrew driven mechanisms have accuracy limitations due to the backlash and wear of the mechanical components, and their acceleration and velocity capabilities are limited as a result of the ballscrew mechanism [12]. On the other hand, linear 1 Amplifier Input Output Controller Motor Encoder motors are gaining popularity for precision positioning applications due to their superior characteristics. Due to their designs, there is no contact between the stationary and moving parts of PMLMs. Hence, backlash or wear is not concerned and nonlinearity due to the contact mechanism is also eliminated. With the linear motors, high acceleration and velocity values can be achieved in long ranges (greater than 100 mm).

As feedback sensors, high-resolution sensors are required in micro/nano-positioning systems in order to satisfy high-precision. Commonly used sensors are laser interferometers, capacitive sensors and optical encoders [12, 13]. Although laser interferometers and capacitive sensors can reach up to sub-nanometer level measurement resolutions, their sensing range is limited to micrometer level [14, 13]. Conversely, measurement ranges of linear optical encoders are higher (hundreds of millimeters) but their resolutions are usually at the micrometer level [15].

In this thesis, the main objective is to design a three-axis micro/nano-positioning device that can operate in long ranges (120 mm x 120 mm x 120 mm). Due to their outstanding characteristics PMLM is used as the actuator in single-axis slider design. Moreover, linear optical encoders are used as feedback sensors since their measurement range is suitable for the desired system. For the design process, modularity is one of the main concerns in order to provide high flexibility in terms of applications and simplify the control of the system. For this purpose, the three-axis positioning system is designed as a combination of modular single axis sliders. With the modular design, the range of the possible applications can be 2 increased with adjustable operation spaces. Several example assembly configurations of modular single-axis sliders are supplied. For the cases with the vertical slider arrangement including the three-axis positioning system presented in this thesis, a counterbalance subsystem is presented. The design processes of mechanical components of the three-axis slider system are explained.

Closed-loop system setup illustration of a typical positioning device is given in Figure 1.1.

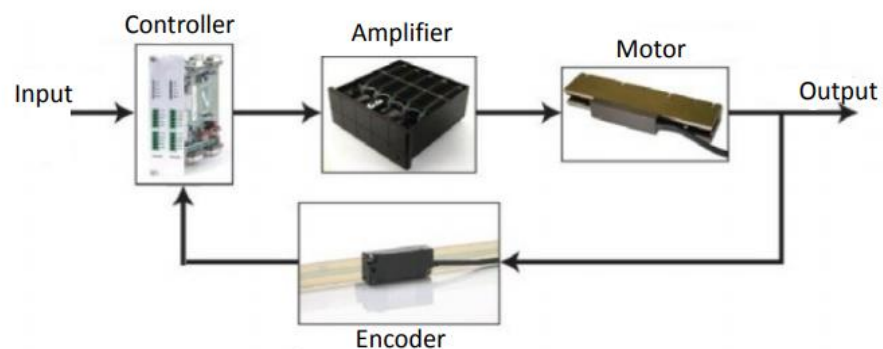


Figure 1.1: Closed Loop System Setup of a Typical Positioning Device

As it can be observed from this figure, the performance characteristics of positioning devices depend highly on the precision and resolution that can be obtained from the encoders. Yet, the achievable resolution with decreasing the pitch of scale grating is limited by the available manufacturing technologies used for the optical encoders [16, 17]. For example, with the currently available manufacturing technologies, commercially available linear optical encoders can have 0.512 micrometers scale grating in pitch satisfying 0.128 micrometers of optical resolution. Hence, in order to achieve high performance with the overall positioning system, it is crucial to increase the resolution of the encoders. Signal processing techniques for interpolation of the available encoder signals serve the further improvement of the encoder resolution by deriving intermediate position values out of the original sinusoidal encoder signals.

In this thesis, a new adaptive approach to obtain high-resolution position information using the original encoder signals is presented. Moreover, the approach is to be suitable for modular sliders in such a manner that the application of the method on different encoders does not require any modifications in the algorithm. For this purpose, an adaptive signal conditioning step to obtain ideal sinusoids with a quadrature phase difference is applied before the interpolation process. Then, the mapping of the first-order signals to higher-order ones is accomplished by a quick-access look-up table. This table is generated offline by using the mathematical values of high-order sinusoids to increase the flexibility of the method for the application of modular slider systems. With the conversion of the high-order sinusoids to binary pulses, high-resolution position information is obtained. External validation of the presented encoder resolution improvement 3 method is accomplished using a laser vibrometer with known measurement resolution. Moreover, practical constraints limiting the application of the method are discussed. The performance of the method is examined by various experiments conducted on single, two and three-axis positioning systems.

The remainder of this thesis is organized as follows. In Chapter 2, background information and previous works in the literature on high-precision positioning system design and encoder resolution improvement methods are reviewed. Chapter 3 presents the design processes of the modular single-axis micro/nano-positioning device. Then, a specific three-axis configuration of single-axis sliders is introduced.

Chapter 2

2 Background Information

In this thesis, the development of a three axes high-precision positioning system and an encoder resolution improvement method proposed for this system is discussed. This chapter reviews the background information and previous work in these areas. For this purpose, firstly, current technologies on micro/nano-positioning systems are presented. Then, the basic idea behind the encoder resolution improvement methods is explained and a literature survey on this subject is introduced.

2.1 Micro/Nano-Positioning Systems

Micro/nano-scale applications require micro/nano-positioning devices with high precision and accuracy. High precision positioning devices are generally constructed as the assembly of separately manufactured single-axis slider systems [7, 5, 6]. Performance characteristics of these systems depend on positioning accuracy, maximum velocity and maximum acceleration that they can operate with acceptable performance based on the application. These characteristics are mostly determined by the actuator that gives motion to the slider. There is a strong relationship between the properties of the actuator used and the performance of the positioning system. Commonly used actuator types for positioning devices are ballscrew mechanisms [5, 11], piezoelectric actuators [8, 9, 10] and permanent magnet linear motors [11, 18, 19, 20, 21, 12].

Ballscrew driven linear actuators are powered by a DC-motor and they can operate in long ranges. In these systems, a ballscrew is coupled with a DC-motor to convert the motor rotary motion into linear motion. An example ballscrew mechanism is given in Figure 2.1 showing the components of the system.

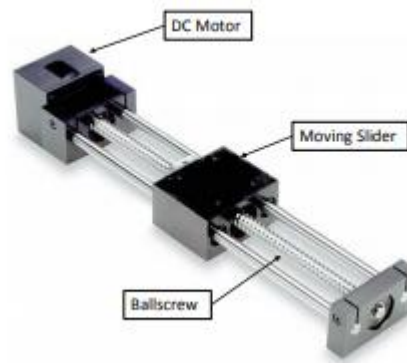


Figure 2.1: Ballscrew Mechanism [1]

As mentioned in literature, ballscrew mechanism driven linear stages have accuracy limitations due to backlash and wear of the mechanical components, and their acceleration and velocity capabilities are limited as a result of the ballscrew mechanism [19, 20, 22, 23, 24]. In this type of linear stages, one of the commonly used methods to calculate the displacement of the slider is that the angular position of the motor is measured and this measurement is simply multiplied by the pitch of the ballscrew. Due to the wear of the mechanical components in time, position, velocity and acceleration measurements obtained using this indirect measurement method may not be reliable [4, 5, 19].

Piezoelectric actuator (Figure 2.2) is another commonly used actuator type in precision positioning devices.



Figure 2.2: Piezoelectric Actuator [2]

Ceramic piezoelectric actuators convert the voltage into displacement. Piezoelectric stage design includes flexures deflected by piezoelectric actuators. Although high accuracy and high precision values can be reached with piezoelectric stages, they cannot be used in many applications since they have limited work-space

(less than 1 mm in each direction) and limited acceleration/velocity response [8, 4, 25].

With the recent commercial introduction of the linear motors, linear motor-driven stages have been gaining popularity in precision engineering applications due to their superior characteristics [26]. A linear motor is an actuator that operates on a flat plane. Similar to the working principle of DC motor, a linear motor converts electromagnetic force into mechanical motion. A linear motor is made of a coil and a magnet rail as shown in Figure 2.3.



Figure 2.3: Permanent Magnet Linear Motor [3]

When current is applied on the coil, the magnetic force moves the motor on the magnet rail. The coil does not touch the magnet rail so that backlash or wear is not a concern. Moreover, nonlinearity due to the contact mechanism is eliminated. Since linear motor-driven stages do not require ballscrews, high acceleration and velocity values can be achieved [11, 27]. Furthermore, permanent magnet linear motors can operate in long ranges (typically greater than ten centimeters) compared to the piezoelectric motors. The position is measured directly on the stage with a linear encoder making the positioning extremely reliable. However, there are nonlinear disturbances in a permanent magnet linear motor due to force ripples that are caused by imperfections in the underlying components. These nonlinearities can be compensated through various control methods [18].

Another important component affecting the performance of a micro/nano-positioning device is the feedback sensor that supplies the position, velocity and acceleration information to the system. As feedback sensors, high-resolution sensors are used in micro/nano-positioning systems in order to satisfy high-precision.

For this purpose, commonly used sensors are laser interferometers, capacitive sensors and optical encoders [12, 16, 17, 13]. Commercially available laser interferometers and capacitive sensors can reach up to sub-nanometer level measurement resolutions [28, 14]. However, their sensing range is very limited (usually smaller than one millimeter) [28, 14, 13]. On the other hand, measurement ranges of linear optical encoders may be around hundreds of millimeters. Yet, their resolutions are limited to micrometer level [15]. Maximum resolution value of commercially available linear optical encoders is $0.128\ \mu\text{m}$ due to current manufacturing technologies. However, using signal processing techniques for interpolation of available encoder signals, nanometer-level resolution can be obtained with linear optical encoders [16, 17, 29, 30]. Hence, linear optical encoders are advantageous over laser interferometers and capacitive sensors when a long range of motion is the main focus of interest.

2.2 Encoder Resolution Improvement Methods

As mentioned previously, precision and resolution of feedback sensors in the system have significant influence on performance characteristics of micro/nano-positioning devices. Therefore, it is important to have high-resolution feedback sensors to obtain high positioning performance. However, available manufacturing technologies allow only a micrometer level of scale grating for linear optical encoders (i.e. maximum $0.128\ \mu\text{m}$ optical resolutions). Hence, further improvement in the resolution of optical encoders is only possible with signal processing techniques. In order to increase the available resolution of an optical encoder, encoder signals should be interpolated to reach intermediate position values.

The basic idea behind an interpolation method is that high order sinusoidal signals can be generated from the original first order analog encoder signals by using a suitable mapping function between them. Converting the calculated high order sinusoids to binary pulses and counting the zero-crossings, intermediate position information can be obtained. In Figure 2.4, an example interpolated signal pair is

given with the ideal encoder signals to demonstrate the basic idea of an interpolation method.

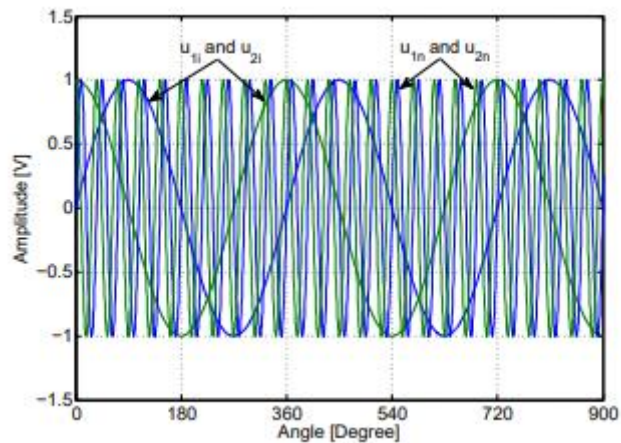


Figure 2.4: Ideal and Interpolated Encoder Signals

In this figure, u_{1n} and u_{2n} are high order signals (10th order for this case) obtained as a result of the interpolation process and u_{1i} and u_{2i} are ideal quadrature encoder signals.

Although it is possible to achieve high-resolution values using various kinds of interpolation techniques, both hardware and software the interpolation methods require ideal encoder signals with a quadrature-phase difference between them. However, the encoder signals usually contain some noise and errors due to encoder scale manufacturing tolerances, assembly problems, operation environment conditions, and electrical grounding problems. Interpolation errors occur while extracting intermediate position information from the distorted pair of sinusoidal encoder signals. Therefore, these errors and noises have to be compensated before the interpolation method is applied. Common errors affecting the quadrature encoder signals are amplitude difference, mean offsets, and quadrature phase-shift errors.

In Figure 2.5, an exaggerated illustration of these errors is shown on an encoder signal pair, u_1 and u_2 . In this figure, mean offsets are denoted as m_1 and m_2 , amplitudes are A_1 and A_2 and ϕ is the phase shift error.

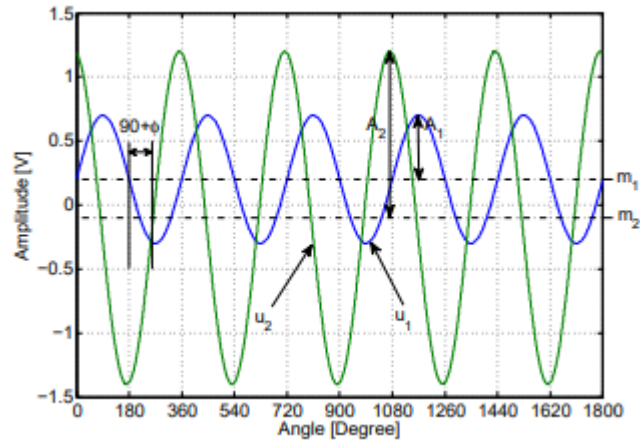


Figure 2.5: Exaggerated Illustration of Original Encoder Signals

For an ideal encoder signal pair, values of m_1 and m_2 should be 0V, A_1 and A_2 should be 1 V and ϕ should be 0 degree. Hence, the basic idea behind a correction method is to compensate these errors using the mathematical relationship between distorted and ideal signal pairs.

So far, many different approaches have been developed to correct the distorted encoder signals containing amplitude errors, mean offsets, and quadrature phase-shift errors. The first introduced method was proposed by Heydemann [31]. In this method, errors in the encoder signal pairs are determined effectively using least-squares minimization. Then, correction is done based on the calculated error values. Since the correction parameters are calculated offline, this method does not offer effective compensation when the errors are changing dynamically 10 throughout the motion. Applications of this correction method can be found in [16] and [30]. In order to compensate for the dynamic errors in encoder signals, several online compensation methods are developed. In [32], Balemi used a gradient search method to calculate the correction parameters online, but the performance of this method is not effective in low frequencies and noisy signals as mentioned in [33]. Another online error compensation method proposed in [17] corrects the sinusoidal signals obtained from a linear optical encoder by making use of an adaptive approach based on radial basis functions neural network. Then, the authors use a similar procedure to increase the resolution of the encoder by mapping the original encoder signals to

high-order sinusoids using another set of radial basis functions. Although high-resolutions can be achieved with this method, it requires a training period for every new encoder. Also, changes in the environmental conditions may require a new training period. Other interpolation methods also exist. In [34], Cheung proposed a sine-cosine interpolation method using logic gates and comparators. In [35], interpolation of encoder signals is accomplished by using digital signal processing (DSP) algorithms followed by the digitization of sinusoidal encoder signals with analog-to-digital converters (ADC). However, these interpolation approaches require external hardware such as a high precision ADCs and DSPs to obtain high resolution from the encoder. Hence, their applicability to typical servo controllers with a digital incremental encoder interface is limited [17]. Another interpolation approach used so far is based on look-up tables. Tan et al. [16] obtained high-order sinusoids from original encoder signals using mathematical relationship between them. Then, they stored the values of high-order sinusoids in a look-up table. Using this table for online mapping of original encoder signals to higher-order ones, they managed to achieve intermediate position values leading high resolution values. Some other hardware and software based interpolation methods are also applied on magnetic encoders and resolver sensors [33, 36, 37].

Chapter 3

3 Design of Micro/Nano-Positioning Device

In this thesis, a specific design of a three-axis micro/nano-positioning device with 120 mm x 120 mm x 120 mm operation space is the main focus of interest. However, this device is constructed by using three of the same modular single-axis sliders perpendicular to each other. In this chapter, first, the design of the modular single-axis slider system is discussed in detail with its components and closed-loop control setup. Improvements made on mechanical components during the design process of single-axis sliders are also summarized. Next, possible assembly configurations of designed modular single-axis sliders are examined. Then, the specific three-axis configuration of sliders is introduced including the counterbalance system, manufacturing and assembly tolerances of the system.

3.1 Modular Single-Axis Slider System

The three-axis positioning system will be composed of three modular single-axis stages assembled perpendicularly as shown in Figure 3.1.



Figure 3.1: 3D Drawing of Three-Axis Positioning System

As a first step to develop this system, a modular linear slider that can achieve micro/nano-meter level positioning over 120 mm operation range is built. In Figure 3.2, a 3D model of designed single-axis linear slider is given.



Figure 3.2: 3D Drawing of Single-Axis Slider

While designing this slider system, components are chosen elaborately to accomplish their specific purpose for micro/nano-positioning tasks. In this section, the mechanical and electrical components of the single-axis slider system are given. The control setup of the closed-loop system is also introduced. Then, details of design improvements of mechanical components are explained with reasoning.

3.1.1 Components and Control Setup

Performance of a micro/nano-positioning device can be evaluated by its working range, maximum velocity and acceleration, positioning resolution and positioning accuracy values. Components of the single-axis slider presented in this thesis are chosen considering these performance characteristics. Moreover, modularity is another concern while designing the mechanical components of the slider.

As illustrated in Figure 3.3 and Figure 3.4, a modular single-axis slider is designed with a stationary base and a moving slider that is connected to each other via cross-roller linear bearings from THK. The stage is actuated by a brushless permanent magnet linear motor from Aerotech Inc. (BLMUC-95 and MTUC 224) whereas the position feedback is taken from an optical linear incremental encoder from Heidenhain Corp. (LIP 481 R). In addition to a linear motor, an optical encoder and linear bearings, eight mechanical components are designed and manufactured for the modular single-axis slider.

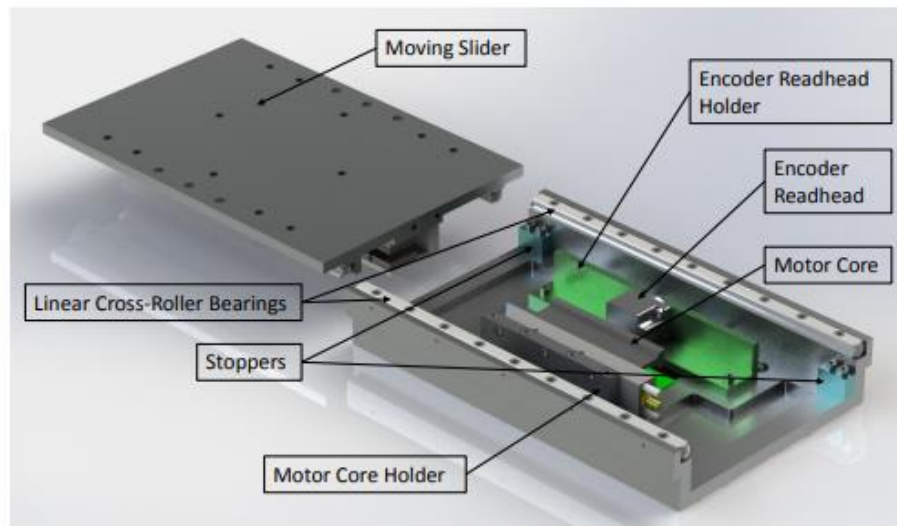


Figure 3.3: Top View of the Designed Single Axis Slider

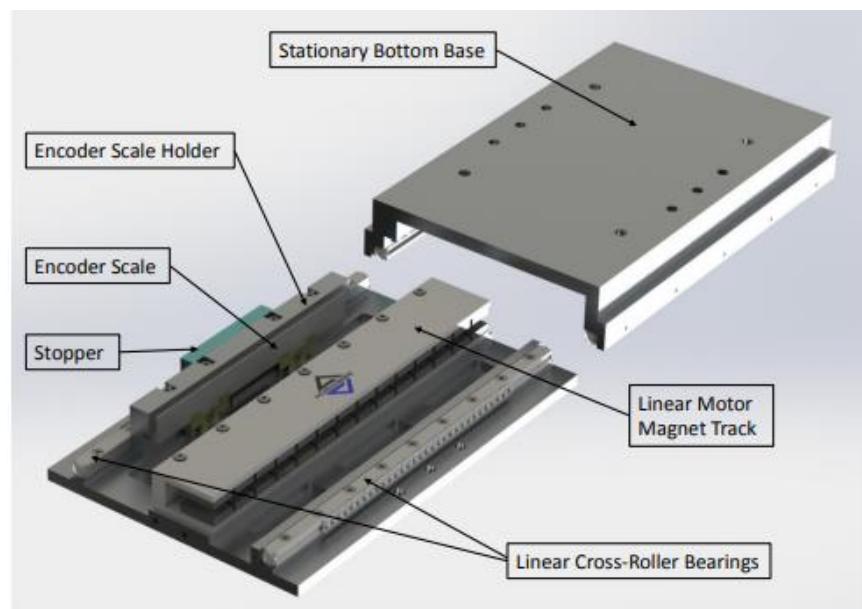


Figure 3.4: Bottom View of the Designed Single Axis Slider

In design of the single-axis slider, linear bearings are chosen to satisfy the linear motion of the sliding part with minimum friction. Cross-roller bearings are used to carry both vertical and horizontal loads effectively. In order to satisfy high precision motion, VR model low-friction, high-accuracy, precision roller bearings [38] are preferred. As the actuator, permanent magnet linear motor is chosen due to its outstanding characteristics in precision positioning applications. The most important feature of this type of actuator is that long ranges (more than 100 mm) can be traveled with high velocity and acceleration. The chosen linear motor, BLMUC

95, is a very compact linear motor with 52.0 mm x 20.8 mm cross-section and 224 mm track length. This feature makes it suitable for compact systems. In order to satisfy the desired 120 mm motion, track length is chosen as 224 mm since linear motors can operate effectively only when the motor coil is inside of the magnet track completely. As mentioned in [3], backlash, windup, wear and maintenance issues associated with ball screws, belts, and rack and pinions are eliminated by the non-contact design of the motor. Moreover, more than 25 N forces can be generated by this motor. Some important specifications of the linear motor used in the single-axis slider system are given in Figure 3.5.

Specifications	Units	BLMUC-95
Continuous Force 1.4 bar	N	40.5
Continuous Force, No Air	N	23.0
Peak Force	N	161.9
Coil Weight	kg	0.12
Coil Length	mm	96
Magnet Track Weight	kg/m	3.33

Figure 3.5: Specifications of BLMUC-95 Linear Motor

In the single-axis slider design, the position is measured directly on the stage with an optical linear incremental encoder (LIP 481 R) so that positioning measurements become extremely reliable. This encoder has 4 μm scale grating in pitch satisfying 1 μm original measurement resolution. However, this resolution is increased up to 10 nm using a new encoder interpolation technique presented in Chapter 4. As described in [15], the readhead and scale of the optical encoder are assembled on the system so that the distance between them is approximately 0.6 mm for effective measurements with low noise levels. In order to satisfy this assembly requirement, a specific plastic sheet with 0.6 mm thickness is placed between the readhead and the scale so that mounting screws can be tightened in correct positions.

As mentioned previously, eight mechanical components are designed and manufactured for the single-axis slider. These parts are stationary bottom base, moving slider, stopper parts, motor core holder, encoder readhead holder and encoder scale holder. All of these parts can be seen in Figure 3.3 and Figure 3.4. While designing these parts, the main concerns are ease of assembly, modularity and compactness. Moreover, the geometrical properties of these parts are designed to keep their rigidity during the manufacturing processes. For modularity purposes, each part is designed so that a single-axis slider can be assembled on another one in various configurations to build single, two or three-axis systems for different applications. Here, any of the configurations can be built without making any modifications in the single-axis slider. In Figure 3.6, designed single-axis slider is given with all of its components.

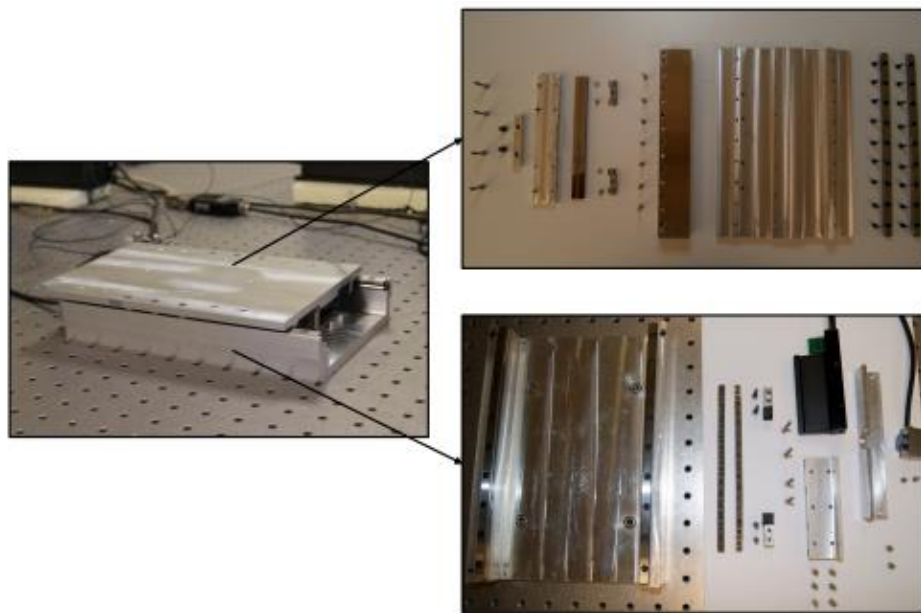


Figure 3.6: Single Axis Slider with its Components

In addition to a suitable mechanical design for micro/nano-positioning applications, an appropriate control setup is required to control the single-axis slider system with high precision. Closed loop configuration of the control system for single-axis slider is given in Figure 3.7

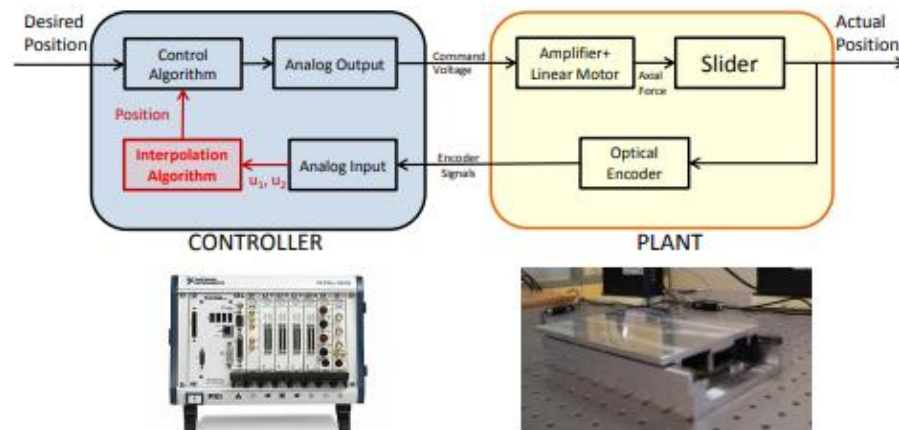


Figure 3.7: Closed Loop Control System Setup of the Single Axis Slider

As it is shown in this figure, a controller and an amplifier is required in the control system. In our system, the control algorithm is developed on a PC using the NI Labview programming environment. Several control schemes are used to control the system including the basic PID control and more complex control techniques such as iterative learning [39], model reference adaptive control. A standard current commanded six-point commutation amplifier from Aerotech Inc. (BA20) is used as an amplifier. In this setup, linear optical encoder data is acquired using an analog data acquisition card attached to the PC. The same data acquisition card is used to send control inputs to the system. All of these components can also be seen in the testbed photograph for single-axis slider in Figure 3.8.

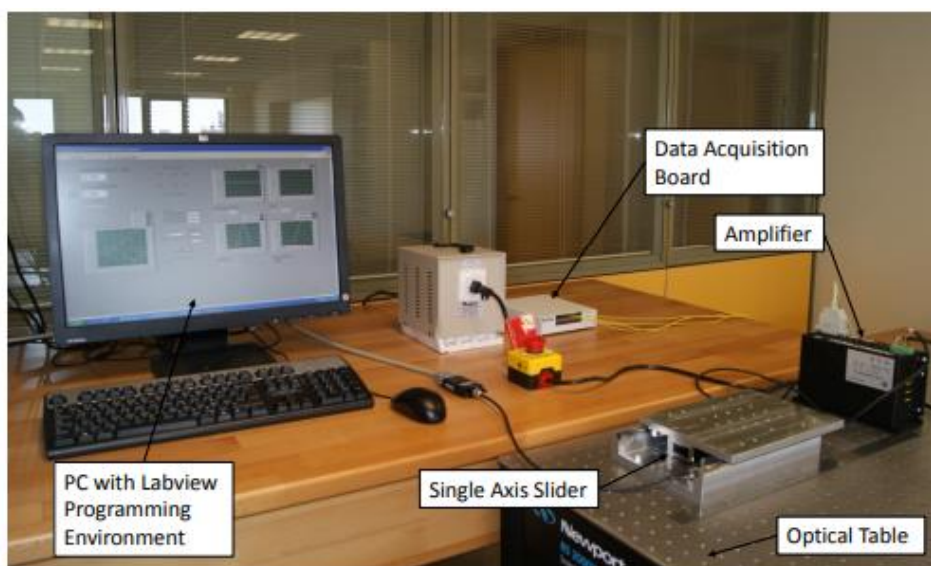


Figure 3.8: Photograph of Testbed for the Single Axis Slider

Bibliography

- [1] <http://www.nookindustries.com/slidesystem/SlideMMSeries.cfm>.
- [2] <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=2026>
- [3] <http://www.aerotech.com/product-catalog/motors/linear-motors.aspx>.
- [4] S. Devasia, E. E. Eleftheriou, and R. Moheimani, “A survey of control issues in nanopositioning,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 15, pp. 802–823, 2007.
- [5] L. Lihua, L. Yingchun, G. Yongfeng, and S. Akira, “Design and testing of a nanometer positioning system,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 132, no. 2, pp. 021011–6, 2010.
- [6] E. Manske, T. Hausotte, R. Mastylo, T. Machleidt, K. Franke, and G. Jager,
“New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes,” *Measurement Science and Technology*, vol. 18, pp. 520–527, 2007.
- [7] C. K. Pang, G. Guo, B. M. Chen, and T. H. Lee, “Self-sensing actuation for nanopositioning and active-mode damping in dual stage HDDs,” *IEEE/ASME Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 11, no. 3, pp. 328–338, 2006.
- [8] S. O. R. Moheimani, “Invited review article: Accurate and fast nanopositioning with piezoelectric tube scanners: Emerging trends and future challenges,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 79, no. 7, pp. 071101–11, 2008.
- [9] S. S. Aphale, S. Devasia, and S. O. R. Moheimani, “High-bandwidth control of a piezoelectric nanopositioning stage in the presence of plant uncertainties,” *Nanotechnology*, vol. 19, no. 12, p. 125503, 2008.
- [10] D. Y. Abramovitch, S. Hoen, and R. Workman, “Semi-automatic tuning of pid gains for atomic force microscopes,” *Asian Journal of Control*, vol. 11, no. 2, pp. 188–195, 2009.
- [11] N. Sclater and N. Chironis, *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook*. McGraw-Hill Professional, fourth edition ed., 2006.
- [12] K. K. Tan, H. Dou, Y. Chen, and T. H. Lee, “High precision linear motor

control via relay-tuning and iterative learning based on zero-phase filtering,” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 244–253, 2001.

[13] W. Kim and S. Verma, “Multiaxis maglev positioner with nanometer resolution over extended travel range,” *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 129, pp. 777–785, Nov. 2007.

[14]

<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prspecs.php?sortnr=2005>

[15] Heidenhain - Exposed Linear Encoders.

[16] K. K. Tan, H. X. Zhou, and T. H. Lee, “New interpolation method for quadrature encoder signals,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, pp. 1073–1079, Oct 2002.

[17] K. K. Tan and K. Z. Tang, “Adaptive online correction and interpolation of quadrature encoder signals using radial basis functions,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, pp. 370–377, May 2005.

[18] D. A. Bristow and A. G. Alleyne, “A high precision motion control system with application to microscale robotic deposition,” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 16, no. 6, pp. 1008–1020, 2006.

[19] L. Xu and B. Yao, “Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: Theory and experiments,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, no. 4, pp. 444–452, 2001.

[20] B. Yao, “Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing,” *Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 595–616, 2002.

[21] Y. S. Huang and C. C. Sung, “Function-based controller for linear motor control systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 1096–1105, 2010.

[22] P. V. D. Braembussche, J. Swevers, H. V. Brussel, and P. Vanherck, “Accurate tracking control of linear synchronous motor machine tool axes,” *Mechatronics(Oxford)*, vol. 6, no. 5, pp. 507–521, 1996.

- [23] D. M. Alter and C. T. Tsao, "Control of linear motors for machine tool feed drives: Design and implementation of h-optimal feedback control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 118, p. 649, 1996.
- [24] D. M. Alter and C. T. Tsao, "Dynamic stiffness enhancement of direct linear motor feed drives for machining," in *Proc. IEEE American Control Conference*, 1994.
- [25] J. Butterworth, L. Pao, and D. Abramovitch, "A comparison of control architectures for atomic force microscopes," *Asian Journal of Control*, vol. 11, no. 2, pp. 175–181, 2009.
- [26] A. Basak, *Permanent-Magnet DC Linear Motors*. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [27] H. Shinno, H. Yoshioka, and K. Taniguchi, "A newly developed linear motordriven aerostatic x-y planar motion table system for nano-machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 369–372, 2007.
- [28] Polytec User Manual - Vibrometer Controller for OFV-5000.
- [29] E. Ulu, N. Gecer-Ulu, and M. Cakmakci, "Adaptive correction and look-up table based interpolation of quadrature encoder signals," in *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Conference*, (Ft. Lauderdale, FL), Oct 2012. To appear.
- [30] K. P. Birch, "Optical fringe subdivision with nanometric accuracy," *Precision Engineering*, vol. 12, Oct 1990.
- [31] P. L. M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," *Applied Optics*, vol. 20, Oct 1981.
- [32] S. Balemi, "Automatic calibration of sinusoidal encoder signals," in *Proc. 16th IFAC World Congress*, (Prague, Czech Republic), Jul 2005.
- [33] H. V. Hoang and J. W. Jeon, "An efficient approach to correct the signals and generate high-resolution quadrature pulses for magnetic encoders," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, Aug 2011.
- [34] N. C. Cheung, "An innovative method to increase the resolution of optical encoders in motion servo systems," in *Proc. IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, (Hong Kong), pp. 797–900, Jul 1999.

[35] A. M. Madni, M. Jumper, and T. Malcolm, “An absolute high-performance, self-calibrating optical rotary positioning system,” in Proc. IEEE Aerospace Conference, vol. 5, pp. 2363–2373, Mar 2001.

[36] H. T. Le, H. V. Hoang, and J. W. Jeon, “Efficient method for correction and interpolation signal of magnetic encoders,” in Proc. IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 1383–1388, Jul 2008.

[37] R. Hoseinnezhad, A. Bab-Hadiashar, and P. Harding, “Calibration of resolver sensors in electromechanical braking systems: A modified recursive weighted least-squares approach,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, pp. 1052–1060, Apr 2007.

[38] THK - Cross Roller Guide/Ball Guide.

[39] N. Gecer-Ulu, E. Ulu, and M. Cakmakci, “Learning based cross-coupled control for multi-axis high precision positioning systems,” in Proc. ASME Dynamic Systems and Control Conference, (Ft. Lauderdale, FL), Oct 2012. To appear.