

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
Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Синхронный электропривод дверей кабины лифта

УДК 62-83:692.812.621.876.11

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМБЛ	Сидорков Михаил Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А. Ю.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., к.т.н.		

Томск – 2018 г.

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

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

УТВЕРЖДАЮ:

Рук. отделения

(Подпись) _____ (Дата) Ю.Н. Дементьев
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Сидорков Михаил Юрьевич

Тема работы:

Синхронный электропривод дверей кабины лифта

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <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>	<ul style="list-style-type: none">• обеспечить функционирование микроконтроллерной системы управления синхронным электроприводом;• разработать имитационную модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами;• провести сравнение идеальной кривой движения электропривода и кривой, полученной в ходе выполнения работы..
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор технической литературы по теме синхронного электропривода. Моделирование синхронного электропривода. Технические решения по реализации управления электроприводом. Исследования синхронного электропривода. Заключение</p>
--	---

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Структурная схема. 2. Имитационная модель. 3. Презентация.</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович
«Социальная ответственность»	Бородин Юрий Викторович

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение; составление математической модели синхронного электропривода; заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	9.09.2016 г.
--	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Сидорков Михаил Юрьевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Сидорков Михаил Юрьевич

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	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>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	27,1 отчисления на социальные нужды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки : -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Оценочная карта QuaD</i>
3. <i>SWOT-анализ</i>
4. <i>График Ганта</i>
5. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
<i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Сидорков М. Ю.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5АМ6Л	ФИО Сидоркову Михаилу Юрьевичу
-----------------	-----------------------------------

Инженерная школа	ИШЭ	Кафедра	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	<p>1. <i>Описание рабочего места на предмет:</i> Разработка системы управления на пользовательском компьютере в помещении площадью 80 м². Проведение экспериментов на стенде с электрооборудованием напряжением до 220 вольт.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	<p>1. <i>Анализ вредных факторов, проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Расчет освещения рабочей зоны, которое должно соответствовать СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, не снижающее зрение человека. – Уменьшение уровня шума. – Проверка уровня воздействия электромагнитного излучения и статического электричества. – Мероприятия для решения проблемы низкой подвижности воздуха. – Мероприятия для уменьшения вибрации. <p>2. <i>Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Составление правил работы с исследуемым оборудованием для предотвращения травматизма от движущихся механизмов. — Электробезопасность. <p>3. <i>Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Правила утилизации твердых отходов. – Анализ влияния электромагнитного и теплового излучения. Меры уменьшения влияния данных факторов. <p>4. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Наиболее вероятным ЧС при исследовании и проверке системы ПЧ – СД являются пожар на рабочем месте. <p>5. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Перечень законодательных и нормативных документов в порядке их цитирования по пунктам раздела.
Перечень расч-го и граф-го материала:	Расчет искусственного освещения для помещения.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Сидорков М. Ю.		

Выпускная квалификационная работа содержит 146 страниц, 52 рисунка, 15 таблиц, 34 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: электропривод, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, система управления, регулятор тока, регулятор скорости, математическая модель синхронного двигателя.

Цель работы – разработка синхронного электропривода, обеспечить функционирование микроконтроллерной системы управления, предусмотреть функционирование регуляторов тока и скорости. Осуществить слежение за положением вала электродвигателя. Построить блоки преобразований Кларка и Парка-Горева. Разработать математическую и имитационную модель электропривода в среде Matlab Simulink. Выполнить сравнение желаемой и реальной кривых движения.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB SIMULINK.	14
1.1. Описание двигателя в неподвижной системе координат ABC	14
1.2. Математическое описание двигателя в системе координат (d, q) ...	20
1.3. Моделирование СДПМ.	22
1.4 Реализация системы управления.....	24
1.4.1 Математическое описание ШИМ.	24
1.4.2 Реализация блока ШИМ.....	27
1.4.3 Разработка координатных преобразователей.	31
1.4.4 Описание модели датчика положения.	35
1.4.5 Реализация модели датчика положения.	36
1.4.6 Реализация модели декодера.	41
1.4.7 Математическое описание регуляторов.....	46
1.4.8 Разработка регуляторов тока	46
1.4.9 Разработка регулятора скорости.....	52
2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ.....	58
2.1 Преобразование расчетов в IQ-математику	58
2.2 Исследование влияния частоты расчета контуров	60
2.3 Исследование влияния параметров настройки регуляторов	63
3. РАБОТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ	68
3.1 Описание работы двигателя	70
3.2. Описание контроллера привода двери	71
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	75

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	76
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	88
4.3 Определение трудоемкости выполнения работ	90
4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	95
Выводы по главе	102
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	104
5.1 Производственная безопасность	104
5.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	105
5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	106
5.4 Экологическая безопасность	109
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	110
5.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
Приложение А	120
Приложение Б.....	143
Приложение В.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений общемировой тенденции развития производства высокотехнологичной электротехнической продукции являются определенные успехи в области создания нового поколения регулируемых электроприводов с использованием вентильных электродвигателей.

Выпуск таких электроприводов осваивают в настоящее время практически все ведущие электротехнические компании. Предложение на рынке вентильных электродвигателей характеризуется широким мощностным диапазоном - от единиц ватт до сотен киловатт, которые могут использоваться в самых различных отраслях промышленности, в том числе и аэрокосмической.

Постоянное удешевление магнитных материалов, а также ускоряющееся развитие аппаратной базы систем управления и устройств силовой электроники сделали возможным применение ВД в тех областях техники, где традиционно применялись только машины постоянного тока или специальные асинхронные двигатели. Такое широкое распространение данного вида двигателей обусловлено рядом технических преимуществ перед асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока. К таким преимуществам относятся:

- бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания. Отсутствие у вентильных электродвигателей скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими двигателями постоянного тока или асинхронными двигателями с явно выраженной обмоткой на роторе;

- обмотка якоря ВД может быть запитана более высоким номинальным напряжением, поэтому конструктивная постоянная момента C_m ВД существенно превышает аналогичную величину классических машин постоянного тока, что позволяет использовать при подключении ВЭП кабели

меньшего сечения и преобразователи электрической энергии на меньшие токи;

- большая перегрузочная способность по моменту (кратковременно кратность максимального момента равна 5 и более);

- высокое быстродействие;

- наивысшие энергетические показатели (кпд и $\cos\varphi$). Показатели кпд вентильных двигателей превышают 90% и очень мало меняются при изменении нагрузки двигателя по мощности и при колебаниях напряжения питающей сети, в то время как у асинхронных электродвигателей максимальный кпд составляет не более 86% и зависит от изменений нагрузки;

- минимальное значение токов холостого хода и рабочих токов, что позволяет достаточно точно измерять нагрузку на привод и оптимизировать режим работы;

- имеют практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения (1:10000 и более) и возможность регулирования частоты вращения по различным законам;

- у вентильных двигателей более простая схема преобразователя по сравнению с асинхронным частотно регулируемым электроприводом;

- низкий перегрев вентильного электродвигателя увеличивает срок службы электропривода, поскольку увеличивается ресурс изоляционных материалов, работающих при более низких температурах. Этот же фактор позволяет электроприводу работать в нестандартных режимах с возможными перегрузками;

- минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях.

Актуальность темы. На современном этапе технологического развития существенно возрастает роль автоматизированного электропривода, который стал в значительной степени определять прогресс в областях

техники и технологии, связанных с воспроизведением механических движений, получаемых путем электромеханического преобразования энергии.

Виды электроприводов:

- Нерегулируемые, простейшие, предназначенные для пуска и остановки двигателя, работающие в односкоростном режиме;
- Регулируемые, допускающие изменение частоты вращения и управление пуском и торможением электродвигателя для заданного технологического процесса. Способ регулирования зависит от типа двигателя. Так, для машин переменного тока применимо управление частотой, током в роторе. Для коллекторных машин применимо регулирование напряжением;
 - Неавтоматизированные;
 - Автоматизированные;
 - Линейные – для частных случаев;
 - Вращательные – наиболее распространённый тип. Чаще всего линейное перемещение получают механическими преобразователями вращательного движения двигателя.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в теории и практике электропривода постоянного тока, массовым промышленным регулируемым электроприводом продолжает оставаться электропривод переменного тока.

Электропривод переменного тока представляет собой сложную электромеханическую систему, обеспечивающую регулирование скорости в заданном диапазоне с требуемой точностью и в общем случае является системой двух взаимодействующих каналов – энергетического (состоящего из участка электрической сети), электрического, электромеханического и механического преобразователей и информационного канала.

В состав регулируемого электропривода входят: электродвигатель, силовой полупроводниковый преобразователь, силовой трансформатор или

коммутирующие дроссели, автоматический выключатель или предохранители.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам, является наиболее перспективной машиной в диапазоне малых и средних мощностей.

Основные преимущества СДПМ:

- Простота конструкции;
- Отсутствие потерь на возбуждение;
- Высокая стабильность скорости ротора.

Эти качества выделяют его из ряда всех остальных машин и обеспечивают ему применение в системах автоматизации, приводах подачи станков, прецизионных системах слежения, а также системах, где стабильность скорости является первостепенным требованием, предъявляемым к технологическому процессу.

Цель работы:

1. Разработка системы управления СДПМ на основе DSP-процессора.
2. Исследование влияния частот расчета контуров на точность отработки задания.
3. Исследование влияния изменения коэффициентов регулятора скорости на характер и качество переходных процессов.

Методы исследований. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы. Теоретическое исследование основано на методах математического анализа. Использован математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились на имитационном стенде в лаборатории.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Разработана детализированная модель сервопривода, учитывающая мертвое время, дискретизацию, метод расчета с фиксированной запятой, а

также исходный код каждого блока полностью аналогичен исходному коду, применяемый в реальных системах.

Практическая ценность работы:

1. Получена имитационная модель для тестирования режимов работы микропроцессорной системы управления на базе DSP с разными частотами работы контуров регулирования;

2. Собран стенд, позволяющий проводить испытания разработанной модели на предмет выявления шумов, ошибок и неточностей при работе контуров регулирования на различных частотах.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB SIMULINK.

1.1. Описание двигателя в неподвижной системе координат ABC

Рассмотрим математическое описание трехфазного вентильного двигателя.

Уравнения равновесия напряжений на фазах СДПМ в общем случае имеют вид, представленный в (1):

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_1}{dt} + I_1 \cdot R &= U \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0); \\ \frac{d\Psi_2}{dt} + I_2 \cdot R &= U \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \frac{d\Psi_3}{dt} + I_3 \cdot R &= U \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right),\end{aligned}\quad (1)$$

где Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 – соответственно потокосцепления фаз А, В и С двигателя;

ϑ – угол поворота ротора.

Потокосцепления фаз двигателя равны:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= L_1 \cdot I_1 + m_{12} \cdot I_2 + m_{13} \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos(\vartheta + \vartheta_0); \\ \Psi_2 &= L_2 \cdot I_2 + m_{21} \cdot I_1 + m_{23} \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \Psi_3 &= L_3 \cdot I_3 + m_{31} \cdot I_1 + m_{32} \cdot I_2 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right),\end{aligned}\quad (2)$$

где Φ – максимальный поток магнита на пару полюсов, сцепленный с фазой;

$w_{1e} = k_{01} \cdot w_1$ – эффективное число витков фазы;

$m_{12}, m_{13}, m_{21}, m_{23}, m_{31}, m_{32}$ – коэффициенты взаимной индукции между фазами двигателя.

Вентильный двигатель с постоянными магнитами на роторе, имеющий магнитную проницаемость, близкую к проницаемости вакуума,

можно уподобить неявнополюсной синхронной машине, коэффициенты взаимной индукции фаз для которой равны:

$$m_{12} = m_{13} = m_{21} = m_{23} = m_{31} = m_{32} = m = -\frac{L}{2}. \quad (3)$$

То же относится и к собственным индуктивностям, для которых можно положить:

$$L_1 = L_2 = L_3 = L. \quad (4)$$

При соединении фаз обмотки статора в звезду (система с изолированной общей точкой), в соответствии с законом Кирхгоффа имеем следующее равенство:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (5)$$

Произведём преобразование уравнений для потокосцеплений. Во все уравнения для потокосцеплений подставим значение коэффициента взаимной индукции $m = -\frac{L}{2}$, и индуктивности фаз, равные L . К тому же на основании первого закона Кирхгоффа, заменим в первом, втором и третьем равенстве значения токов соответственно:

$$\begin{aligned} I_2 + I_3 &= -I_1; \\ I_1 + I_3 &= -I_2; \\ I_1 + I_2 &= -I_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Производя подстановку, получим следующие выражения для потокосцеплений:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_1 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos(\vartheta + \vartheta_0); \\ \Psi_2 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_2 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \Psi_3 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя полученные уравнения в исходную систему уравнений, и производя дифференцирование по времени, получаем следующую систему уравнений равновесия напряжений фаз:

$$\begin{aligned}
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) &= U \sin(\vartheta + \vartheta_0); \\
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) &= U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_3}{dt} + I_3 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) &= U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right),
\end{aligned} \quad (8)$$

где $C_e = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_{01} \cdot w_1 \cdot \Phi$ – коэффициент ЭДС двигателя;

$\Omega = \frac{1}{z_p} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$ – скорость вращения ротора.

Электромагнитный момент двигателя будет определяться выражением

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot \left(I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_3 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right), \quad (9)$$

где $C_M = C_e$ – коэффициент момента двигателя.

Таким образом, полная система уравнений, описывающая СДПМ в динамических и статических режимах работы, будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned}
&\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) = U \sin(\vartheta + \vartheta_0 + \vartheta) \\
&\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
&\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_3}{dt} + I_3 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
&M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot \left(I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_3 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
&M_{\text{ЭМ}} - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \\
&\vartheta = z_p \cdot \int_0^t \Omega dt
\end{aligned} \right. \quad (10)$$

Для построения математической модели произведём преобразование полученной системы уравнений. Применяя к уравнениям равновесия напряжений преобразование Лапласа и разрешая их относительно токов I_1, I_2, I_3 , получаем искомую систему уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_1(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot (U \sin(\vartheta + \vartheta_0) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0)) \\
I_2(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot \left(U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
I_3(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot \left(U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
M_{\text{эм}} = C_M \cdot \left(I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
M_{\text{эм}} - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \\
\vartheta = z_p \cdot \int_0^t \Omega dt
\end{array} \right. \quad (11)$$

где $T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{L}{R}$ – электромагнитная постоянная времени двигателя.

Используя полученную систему уравнений, производим построение структурной схемы двигателя. Для формирования управляющего воздействия на входе системы необходимо установить обратный преобразователь Парка, для контроля тока электродвигателя – обратный преобразователь Парка. Структурная схема трехфазного вентильного двигателя приведена на рисунке 1. Структурные схемы прямого и обратного преобразований Парка приведены на рисунке 2.

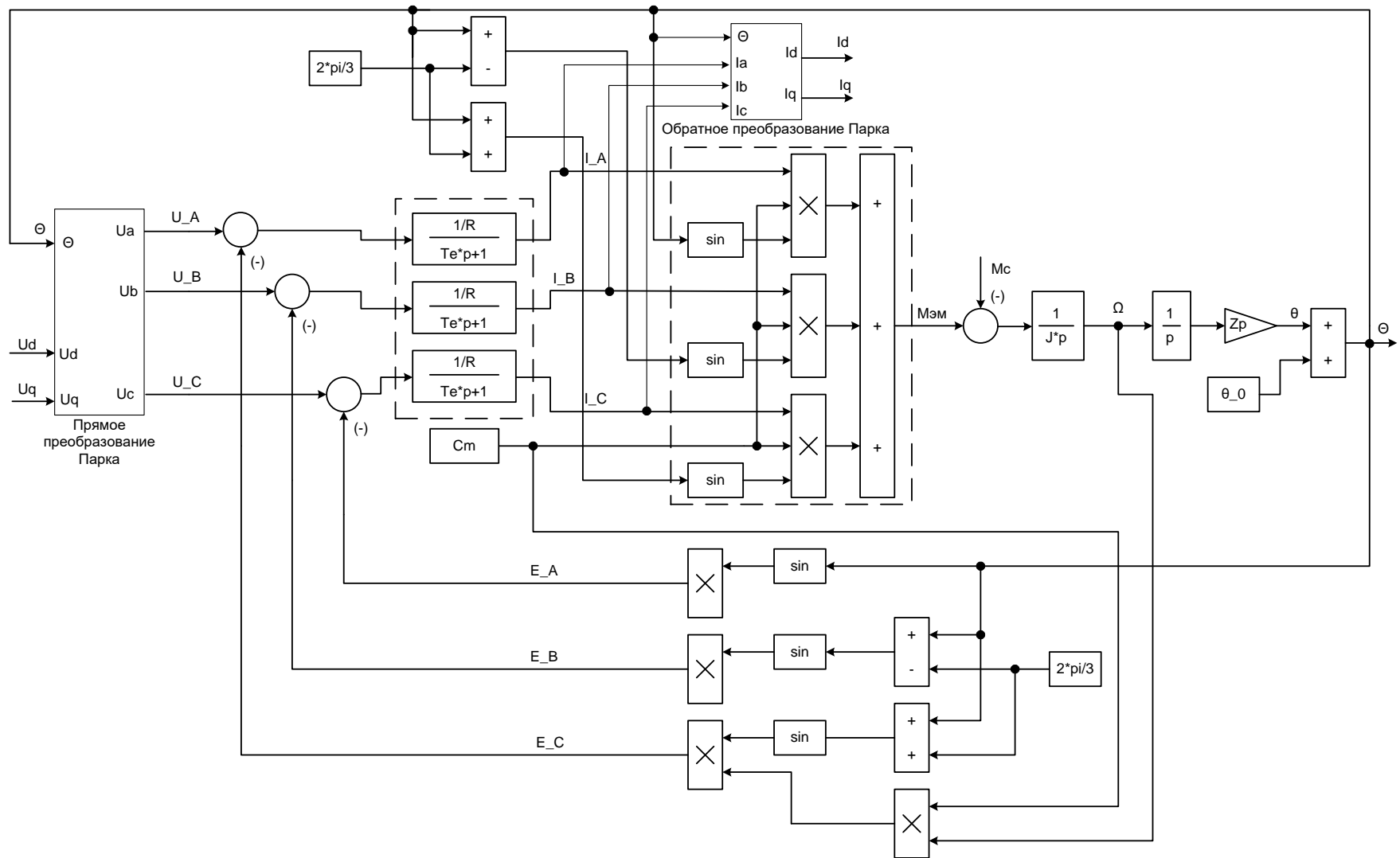
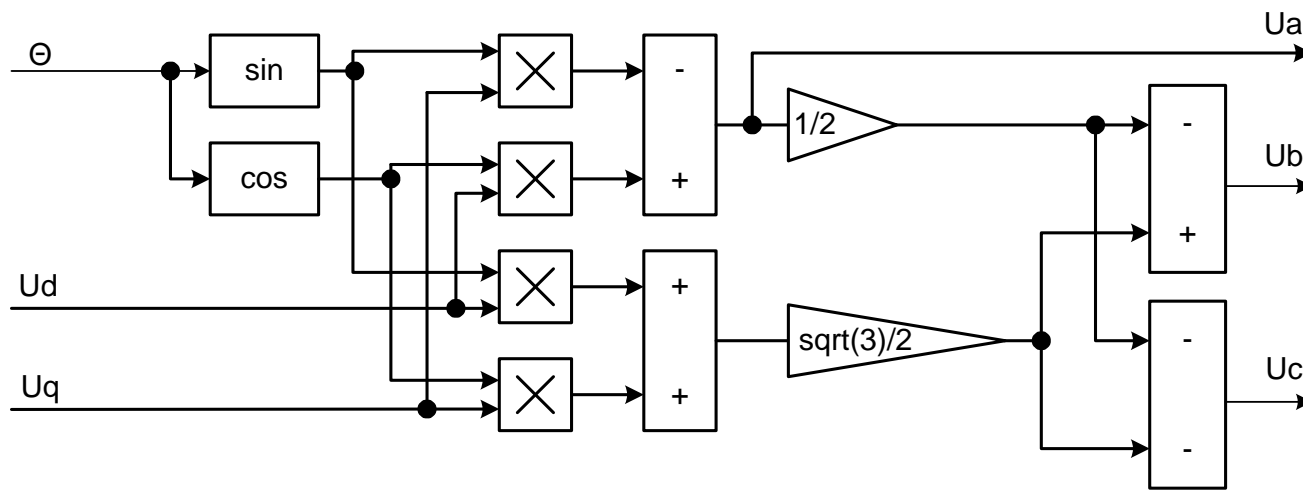
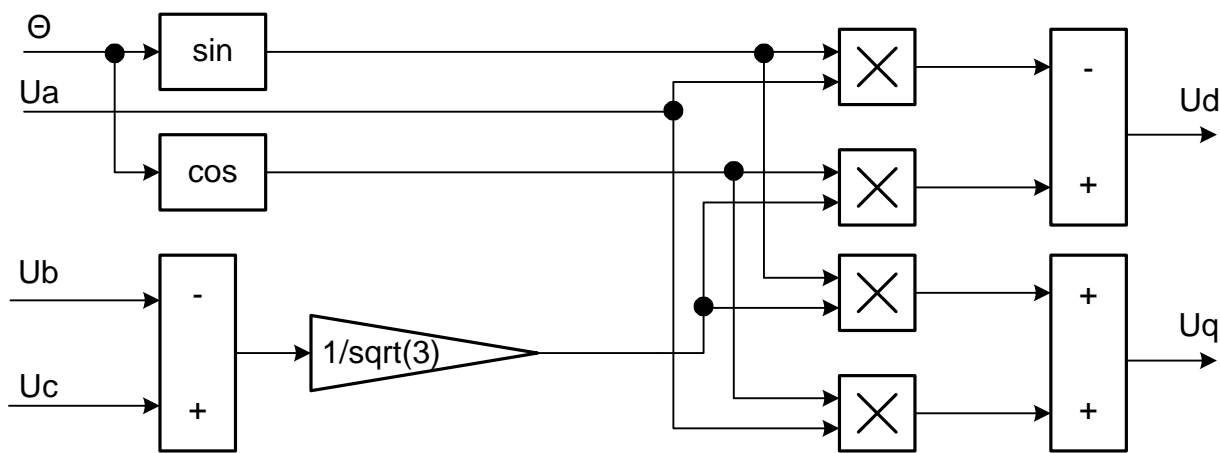


Рисунок 1 – Структурная схема трехфазного вентильного двигателя



a)



б)

Рисунок 2 – Структурная схема а) – прямого преобразования Парка; б) – обратного преобразования Парка

1.2. Математическое описание двигателя в системе координат (d, q)

Рассмотрим математическое описание синхронной машины с постоянными магнитами в ортогональной системе координат (d, q), ось d которой ориентирована по магнитной оси ротора. [1]

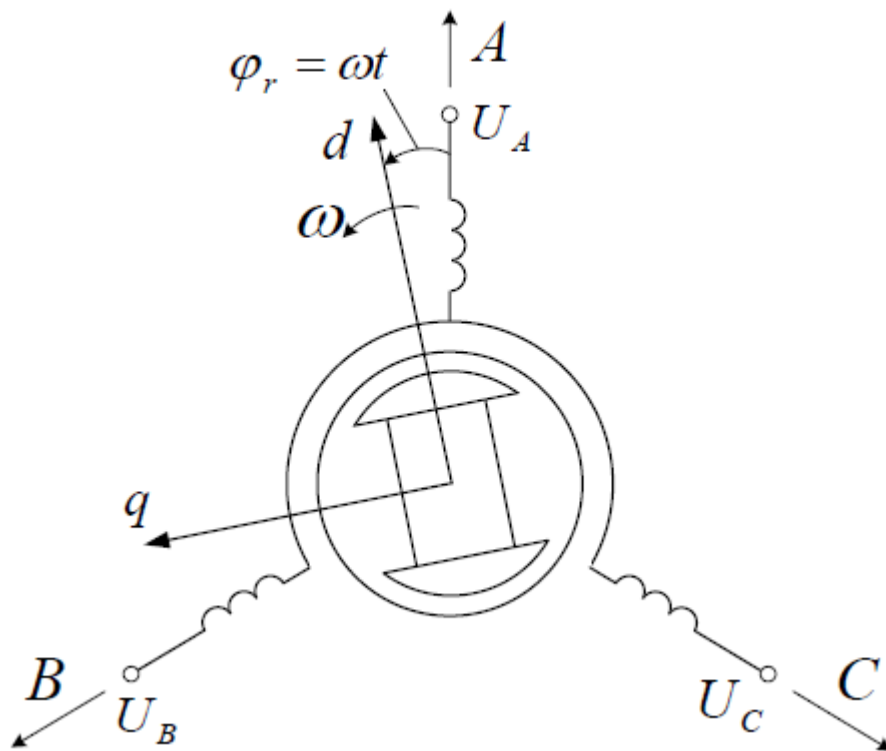


Рисунок 3 – Модель СДПМ

При построении математической модели вентильного двигателя примем следующие допущения:

- отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивности рассеяния не зависят от положения ротора в пространстве.

В таком случае математическое описание двигателя можно представить в следующем виде:

- уравнения электрического равновесия

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega + R_s \cdot I_d, \\ U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \cdot \omega + R_s \cdot I_q; \end{aligned} \quad (12)$$

- уравнения электромагнитного равновесия

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d \cdot I_d + \Psi_f, \\ \Psi_q &= L_q \cdot I_q, \\ M_{эм} &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d); \end{aligned} \quad (13)$$

- уравнение движения электропривода

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J_{дв}} \cdot (M_{эм} - M_c - \beta \cdot \Omega), \\ \Omega &= \frac{\omega}{z_p}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

I_d, I_q, U_d, U_q – токи и напряжения статора по осям d и q;

$M_{эм}, M_c$ – электромагнитный и нагрузочный моменты двигателя;

$J_{дв}$ – момент инерции ротора;

β – коэффициент вязкого трения (коэффициент демпфирования);

ω – электрическая частота вращения;

Ψ_d, Ψ_q, Ψ_f – соответственно потокосцепления по осям d и q статора, и

постоянных магнитов ротора;

L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям ротора;

R_s – активное сопротивление фазы обмотки статора.

Записывая уравнения электрического и электромагнитного равновесия относительно токов I_d и I_q , получаем,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (U_q - R_s \cdot I_q - \omega \cdot L_d \cdot I_d - \omega \cdot \Psi_f) \\ \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (U_d - R_s \cdot I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q) \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot [\Psi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d] \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J_{дв}} \cdot (M_{эм} - M_c - \beta \cdot \Omega) \end{array} \right. \quad (15)$$

Для построения структурной схемы СДПМ соответствующей данной системе уравнений примем следующие допущения,[2]

- для частного случая неявнополюсной конструкции ротора принимаем $L_d = L_q = L_s$;
- принимаем коэффициент демпфирования $\beta = 0$.

Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами в осях d и q приведена на рисунке 4.

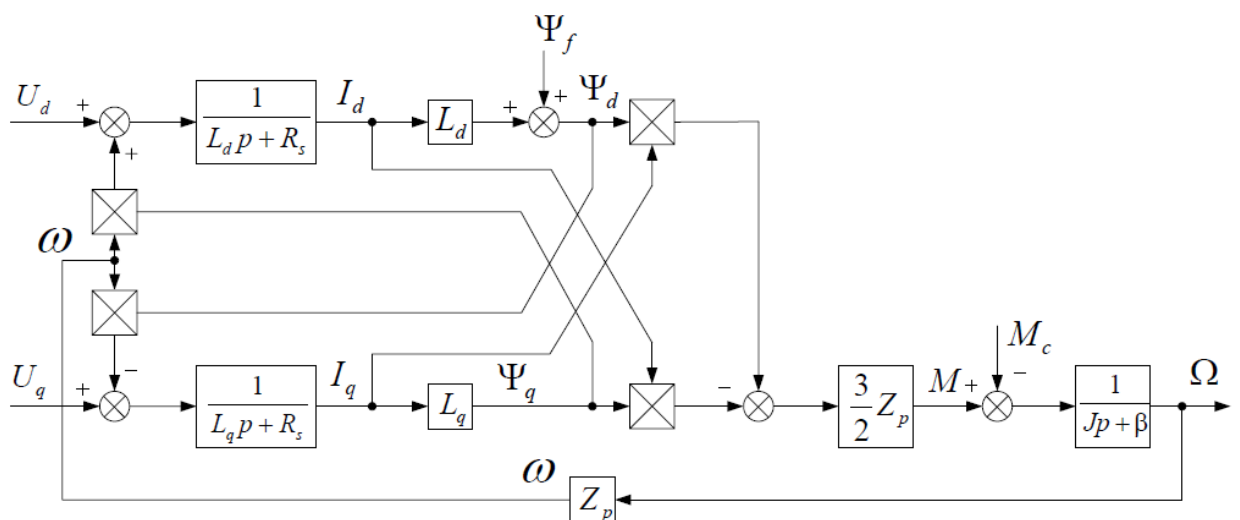


Рисунок 4 – Структурная схема СДПМ в осях d и q

1.3. Моделирование СДПМ.

Необходимо разработать управляющий алгоритм микропроцессорной системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Система будет обеспечивать отработку заданной скорости вращения и

положения при различных моментах нагрузки. В качестве силовой схемы рассматривается IGBT - мост.

Для разработки алгоритма управления сначала разработаем модель электропривода. Для этого в системе Matlab Simulink открываем новое рабочее окно и вносим в него готовую модель СДПМ «PMSM Machine». В целях проверки работоспособности модели двигателя подадим на него трехфазное напряжение, для чего используем элементы «400v 50 Hz Source». Для вывода координат двигателя используем осциллограф «Scope» (см. рисунок 2). Устанавливаем время моделирования 0.3 секунды, запускаем моделирование и наблюдаем переходные характеристики по электромагнитному моменту, току и скорости двигателя (см. рисунок 2).

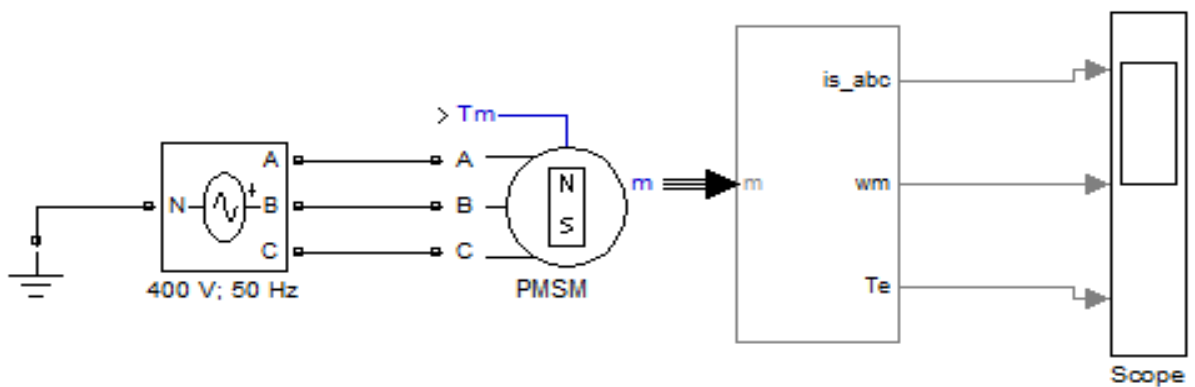


Рисунок 5 – модель СДПМ в программной среде MATLAB Simulink

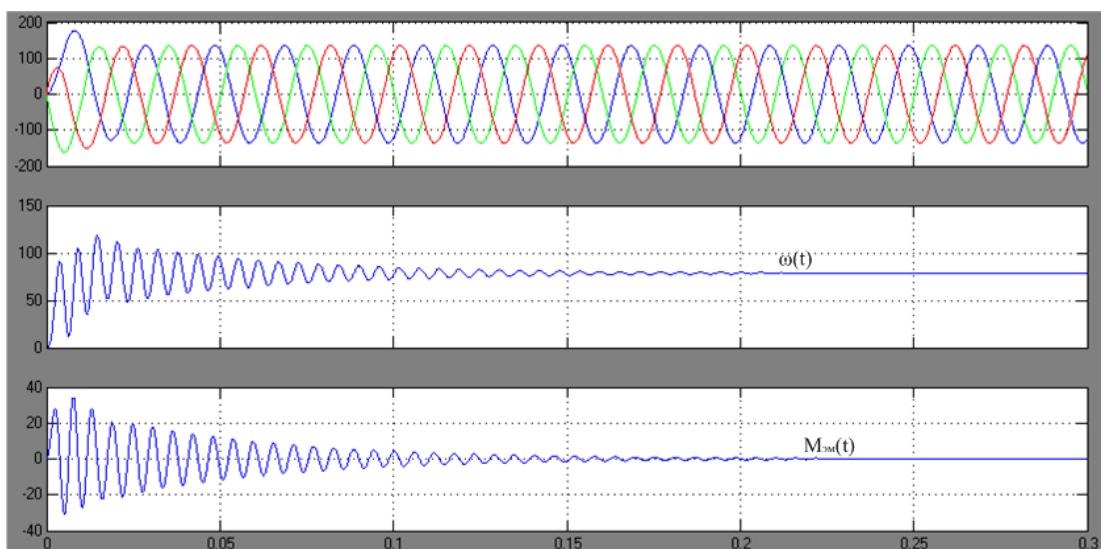


Рисунок 6 – Переходные процессы СДПМ при пуске по схеме на рисунке 5

Как показывает осциллограф, компонент модели двигателя одновременно посылает на визуализацию вектор данных, состоящий из сигнала скорости тока и крутящего момента двигателя. По переходным процессам прямого пуска видно, что представленная модель ведет себя адекватно.

1.4 Реализация системы управления.

1.4.1 Математическое описание ШИМ.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ, англ. Pulse-width modulation (PWM)) — приближение желаемого сигнала (многоуровневого или непрерывного) к действительным бинарным сигналам (с двумя уровнями - вкл/выкл), так, что, в среднем, за некоторый отрезок времени, их значения равны. Формально, это можно записать так:

$$\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt = \sum A \cdot \Delta T_i \quad (16)$$

где $x(t)$ - желаемый входной сигнал в пределе от t_1 до t_2 , а ΔT_i - продолжительность i -го ШИМ импульса, каждого с амплитудой A . ΔT_i подбирается таким образом, что суммарные площади (энергии) обеих величин приблизительно равны за достаточно продолжительный промежуток времени, равны так же и средние значения величин за период:

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt}{t_2 - t_1} = \frac{\sum A \cdot \Delta T_i}{t_2 - t_1} \quad (17)$$

Управляемыми "уровнями", как правило, являются параметры питания силовой установки, например, напряжение импульсных преобразователей регуляторов постоянного напряжения/или скорость электродвигателя. Для импульсных источников $x(t) = U_{const}$ стабилизации.

ШИП — широтно-импульсный преобразователь, генерирующий ШИМ-сигнал по заданному значению управляющего напряжения. Основное достоинство ШИМ — высокий КПД его усилителей мощности, который достигается за счёт использования их исключительно в ключевом режиме. Это значительно уменьшает выделение мощности на силовом преобразователе (СП).[3]

При широтно-импульсной модуляции в качестве несущего колебания используется периодическая последовательность прямоугольных импульсов, а информационным параметром, связанным с дискретным модулирующим сигналом, является длительность этих импульсов. Периодическая последовательность прямоугольных импульсов одинаковой длительности имеет постоянную составляющую, обратно пропорциональную скважности импульсов, то есть прямо пропорциональную их длительности. Пропустив импульсы через ФНЧ с частотой среза, значительно меньшей, чем частота следования импульсов, эту постоянную составляющую можно легко выделить, получив постоянное напряжение. Если длительность импульсов будет различной, ФНЧ выделит медленно меняющееся напряжение, отслеживающее закон изменения длительности импульсов. Таким образом, с помощью ШИМ можно создать несложный ЦАП: значения отсчётов сигнала кодируются длительностью импульсов, а ФНЧ преобразует импульсную последовательность в плавно меняющийся сигнал.

ШИМ использует транзисторы (могут быть и др. элементы) не в активном (правильнее будет сказать - линейном), а в ключевом режиме, то есть транзистор всё время или разомкнут (выключен), или замкнут (находится в состоянии насыщения). В первом случае транзистор имеет бесконечное сопротивление, поэтому ток в цепи не течёт, и, хотя всё напряжение питания падает на транзисторе, то есть КПД=0 %, в абсолютном выражении выделяемая на транзисторе мощность равна нулю. Во втором случае сопротивление транзистора крайне мало, и, следовательно, падение напряжения на нём близко к нулю — выделяемая мощность так же мала.

$$1. R_r \rightarrow \infty \leftrightarrow P = \frac{U^2}{R} \rightarrow 0 \quad (18)$$

$$2. R_r \rightarrow 0 \leftrightarrow P = I^2 \cdot R \rightarrow 0 \quad (19)$$

ШИМ есть импульсный сигнал постоянной частоты и переменной скважности, то есть отношения длительности импульса к периоду его

следования. С помощью задания скважности (длительности импульсов) можно менять среднее напряжение на выходе ШИМ.

Генерируется аналоговым компаратором, на отрицательный вход которого подаётся опорный сигнал в виде «пилы» или «треугольника», а на положительный — собственно сам модулируемый непрерывный аналоговый сигнал. Частота импульсов соответствует частоте «зубьев» пилы. Ту часть периода, когда входной сигнал выше опорного, на выходе получается единица, ниже — нуль.

В цифровой технике, выходы которой могут принимать только одно из двух значений, приближение желаемого среднего уровня выхода при помощи ШИМ является совершенно естественным. Схема настолько же проста: пилообразный сигнал генерируется N-битным счётчиком. Цифровые устройства (ЦШИП) работают на фиксированной частоте, обычно намного превышающей реакцию управляемых установок (передискретизация). В периоды между фронтами тактовых импульсов, выход ЦШИП остаётся стабильным, на нём действует либо низкий уровень либо высокий, в зависимости от выхода цифрового компаратора, сравнивающего значение счётчика с уровнем приближаемого цифрового сигнала $V(n)$. Выход за много тактов можно трактовать как череду импульсов с двумя возможными значениями 0 и 1, сменяющимися друг – друга каждый такт T . Частота появления единичных импульсов получается пропорциональной уровню приближаемого сигнала $\sim V(n)$. Единицы, следующие одна за другой, формируют контур одного, более широкого импульса. Длительности полученных импульсов переменной ширины $\sim V(n)$, кратны периоду тактирования T , а частота равна $\frac{1}{2NT}$. Низкая частота означает длительные, относительно T , периоды постоянства сигнала одного уровня, что даёт невысокую равномерность распределения импульсов.

Восстанавливается непрерывный аналоговый сигнал арифметическим усреднением импульсов за много периодов при помощи простейшего фильтра

низких частот. Хотя обычно даже этого не требуется, так как электромеханические составляющие привода обладают индуктивностью, а объект управления (ОУ) — инерцией, импульсы с выхода ШИП сглаживаются и ОУ, при достаточной частоте ШИМ-сигнала, ведёт себя как при управлении обычным аналоговым сигналом. [4,5]

1.4.2 Реализация блока ШИМ

Применение инвертора в ЭП обеспечивает наиболее экономичные способы регулирования скорости и момента электродвигателей переменного тока.

Автономный инвертор напряжения представляет собой коммутатор на основе полностью управляемых переключающих элементов – силовых ключей, в качестве которых используют полностью управляемые полупроводниковые приборы в виде силовых транзисторов или запираемых тиристоров.

Инверторы напряжения совместимы с нагрузкой активно-индуктивного характера и благодаря специальному алгоритму формирования управляющих импульсов обеспечивают требуемую величину и форму выходного напряжения. Для управления ключами автономного инвертора используются различные законы ШИМ: синусоидальный, векторный и т.д. [6,7]

В разрабатываемой модели процесс генерации импульсов ШИМ для инвертора основывается на сравнении входного синусоидального сигнала задания с искусственно-генерируемым пилообразным сигналом. Пилообразный сигнал генерируется двунаправленным счетчиком, который считает от нуля до величины периода таймера и обратно до нуля. Период таймера принят равным 100. Частота расчета таймера больше частоты ШИМ в n раз:

$$f_{timer} = f_{PWM} \cdot n = 10000 \cdot 100 = 1 \text{ МГц}, \quad (20)$$

где $n=100$ – период таймера.

Сравнение происходит следующим образом: величина сравнения равна сумме величины входного синусоидального сигнала в настоящий момент времени и половины периода таймера:

$$cmp = U_i + \frac{N}{2} = U_i + 50, \quad (21)$$

где U_i - величина входного синусоидального сигнала в текущий момент времени.

Когда величина счетчика становится больше величины сравнения, подается отпирающий импульс на верхний транзистор стойки, в обратном случае подается отпирающий импульс на нижний транзистор. График, описывающий данное сравнение представлен на рисунке 7 .

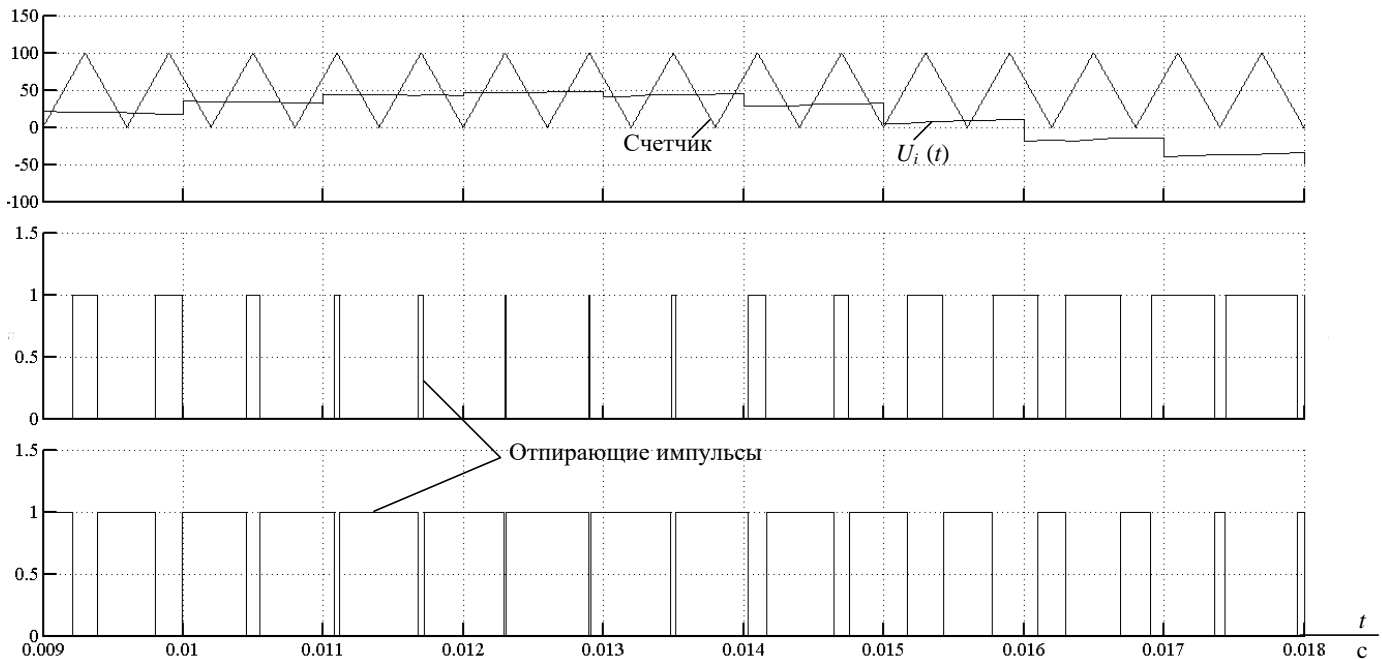


Рисунок 7 – График, показывающий формирование сигналов ШИМ

На рисунке 9 изображена модель формирователей импульсов ШИМ с инвертором. Входные синусоидальные сигналы задания заходят в схему на контакты IN_A, IN_B, IN_C. Блоки формирователей импульсов PWM_A, PWM_B и PWM_C подают отпирающие импульсы со своих выводов outH и outL соответственно на управляющие выходы верхних и нижних транзисторов стойки. Отличием данного преобразователя от стандартных преобразователей библиотеки Matlab является наличие возможности учитывать «мертвое время», которое, так или иначе, присутствует в реальных микропроцессорных системах управления. [8,9]

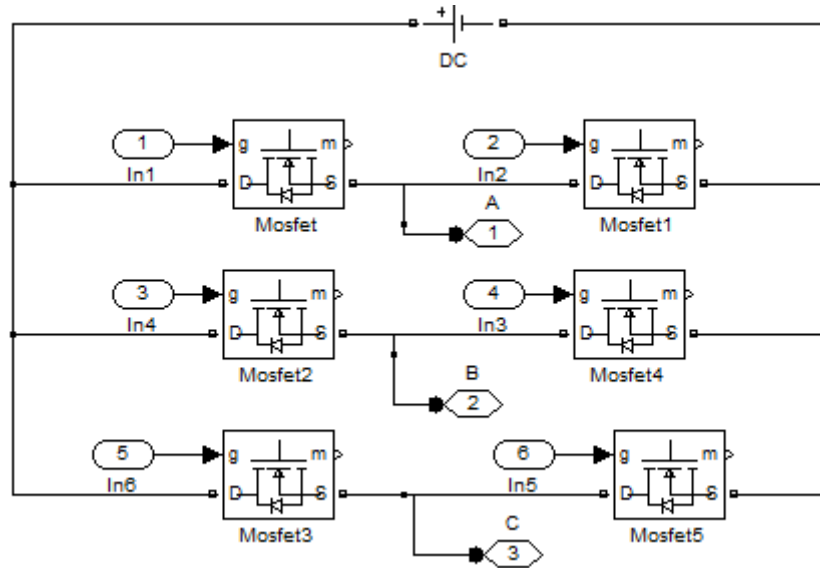


Рисунок 8 – Блок трехфазного IGBT-моста

Импульсы управления на транзисторы подаются с генератора ШИМ, реализованного на базе S-функции и представленного на рисунке 9.[10]

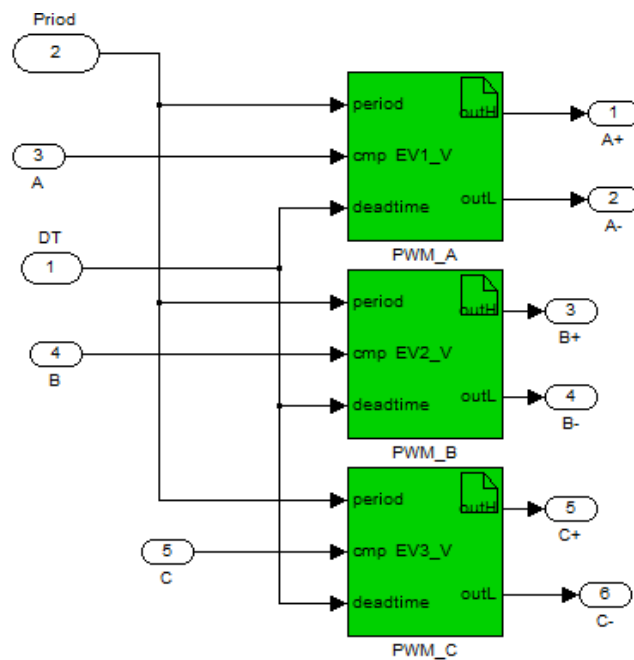


Рисунок 9 – Блок формирования ШИМ

Код блока PWM_A представлен ниже:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;
unsigned int compare=0;
compare = cmp[0]+period[0]/2;
if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;
if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;
if (counter>compare)

```

```

        {
            outH[0]=1;
            outL[0]=0;
        }
else
    {
        outH[0]=0;
        outL[0]=1;
    }

if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
    {
        outL[0]=0;
        outH[0]=0;
    }

```

Код блока PWM_B:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;
unsigned int compare=0;

compare = cmp[0]+period[0]/2;

if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;

if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;

if (counter>compare)
    {
        outH[0]=1;
        outL[0]=0;
    }
else
    {
        outH[0]=0;
        outL[0]=1;
    }

if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
    {
        outL[0]=0;
        outH[0]=0;
    }

```

Код блока PWM_C:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;
unsigned int compare=0;

compare = cmp[0]+period[0]/2;

if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;

```

```

if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;

if (counter>compare)
{
    outH[0]=1;
    outL[0]=0;
}
else
{
    outH[0]=0;
    outL[0]=1;
}

if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
{
    outL[0]=0;
    outH[0]=0;
}

```

1.4.3 Разработка координатных преобразователей.

Моделирование электропривода будем производить в программной среде MATLAB Simulink с помощью блоков «S-function builder», что в некоторых случаях дает возможность их последующей программной реализации на цифровом сигнальном процессоре за счет простого переноса кода на языке Си.

Для векторной системы управления необходимы следующие преобразователи координат: из трехфазной неподвижной системы в неподвижную декартову систему (преобразование Кларка), из двухфазной (декартовой) неподвижной в двухфазную вращающуюся систему (преобразование Парка-Горева), а также обратные данным преобразования.

Преобразование из трехфазной системы координат a , b , c в неподвижную декартовую систему координат α , β производится в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha} &= i_a, \\
 i_{\beta} &= \frac{i_a + 2 \cdot i_b}{\sqrt{3}}.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Графическая иллюстрация последовательности данного преобразования приведена на рисунке 10.

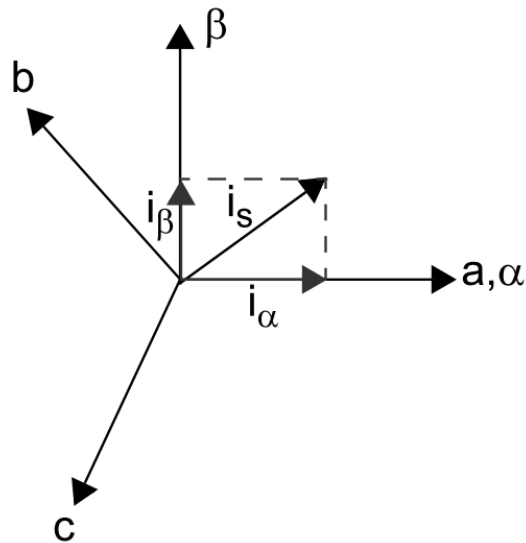


Рисунок 10 – Графическая иллюстрация преобразования Кларка

Для реализации данного преобразования в среде MATLAB Simulink создадим блок «CLARKE» (рисунок 11), имеющий два входа (i_a , i_b) и два выхода (i_{alfa} , i_{beta}).

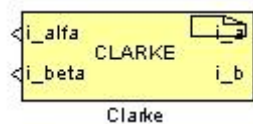


Рисунок 11 – Внешний вид блока прямого преобразования Кларка

Последовательность преобразования токов из неподвижной системы координат α , β к вращающейся системе координат d , q (преобразование Парка-Горева) производится в соответствии с соотношениями

$$\begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta, \\ i_q &= -i_\alpha \cdot \sin \theta + i_\beta \cdot \cos \theta, \end{aligned} \quad (23)$$

где θ – угол положения вектора потокосцепления, он же угол между координатными осями неподвижной и вращающейся систем.

Графическая иллюстрация последовательности данного преобразования приведена на рисунке Рисунок 12.

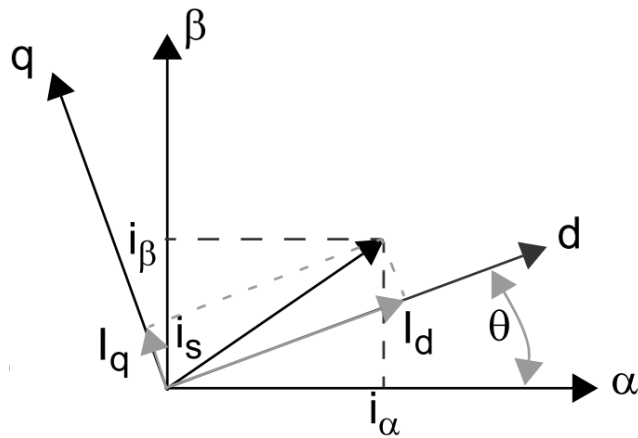


Рисунок 12 – Графическая иллюстрация преобразования Парка-Горева

Для реализации данного преобразования в среде MATLAB Simulink создадим блок «PARK» (рисунок 13), имеющий три входа (park_alfa, park_beta, theta) и два выхода (park_X, park_Y).

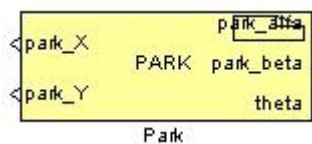


Рисунок 23 – Внешний вид блока прямого преобразования Парка-Горева

Последовательность преобразования напряжений из вращающейся системы координат d, q к неподвижной системе координат α, β (обратное преобразование Парка-Горева) производится в соответствии с соотношениями

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= i_d \cdot \cos \theta - i_q \cdot \sin \theta, \\ i_{\beta} &= i_d \cdot \sin \theta + i_q \cdot \cos \theta. \end{aligned} \quad (24)$$

Графическая иллюстрация последовательности данного преобразования приведена на рисунке 14.

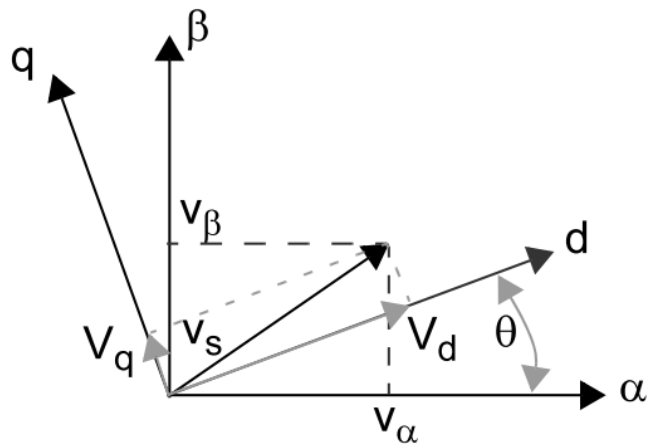


Рисунок 34 – Графическая иллюстрация обратного преобразования Парка-Горва

Для реализации данного преобразования в среде MATLAB Simulink создадим блок «I_PARK» (рисунок 15), имеющий три входа (ipark_X, ipark_Y, theta) и два выхода (ipark_alfa, ipark_beta).

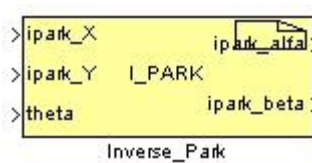


Рисунок 45 – Внешний вид блока обратного преобразования Парка-Горва

Преобразование из неподвижной декартовой системы координат α , β в трехфазную систему координат a , b , c (обратное преобразование Кларка) производится в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned}
 U_a &= U_\alpha, \\
 U_b &= \frac{-U_\alpha + \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2}, \\
 U_c &= \frac{-U_\alpha - \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Графическая иллюстрация последовательности данного преобразования приведена на рисунке 1 Рисунок 6.

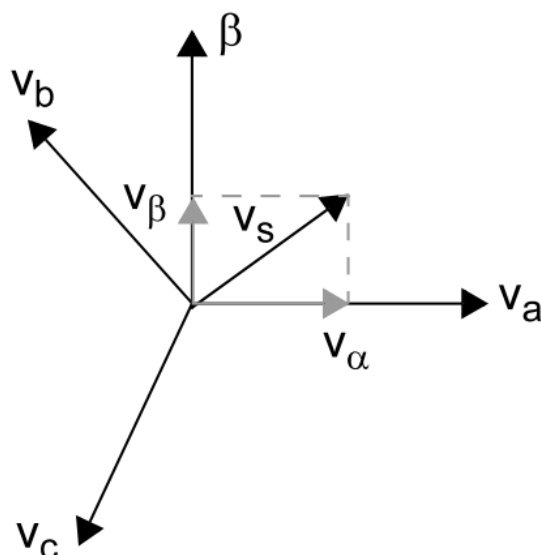


Рисунок 16 – Графическая иллюстрация обратного преобразования Кларка

Для реализации данного преобразования в среде MATLAB Simulink создадим блок «I_CLARKE» (рисунок 1Рисунок 57), имеющий два входа (Ualfa, Ubeta) и три выхода (U_A, U_B, U_C).

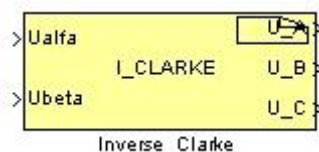


Рисунок 5 – Внешний вид блока обратного преобразования Кларка

1.4.4 Описание модели датчика положения.

Резольвер— sin-cos датчик обратной связи для измерения положения и скорости вращения ротора (аналог СКВТ).

На самом деле резольвер – маленький мотор, у которого есть статор и ротор. Статор имеет три обмотки: обмотка возбуждения и две двухфазных обмотки (обычно обозначенные «X» и «Y»). Обмотка возбуждения расположена наверху, по факту она является обмоткой вращающегося трансформатора. Этот трансформатор питает ротор, следовательно, отпадает необходимость в щетках, две остальные обмотки находятся внизу, намотаны друг на друга. Они сдвинуты на 90 градусов. Ротор вмещает обмотку, которая в

свою очередь является вторичной обмоткой вращающегося трансформатора, возбуждающей две двухфазные обмотки на статоре.

Первичная обмотка трансформатора, расположенная на статоре, возбуждается синусоидальным током. Две двухфазные обмотки, расположенные под 90 градусов на статоре, обеспечивают синусную и косинусную обратную связь. Относительные величины двухфазных напряжений измеряются и используются, что бы определить угол отклонения ротора по отношению к статору. После полного оборота, сигналы в обратной связи восстанавливают свои первоначальные формы.

1.4.5 Реализация модели датчика положения.

Входным значением датчика является положение вала двигателя и опорный сигнал частотой 8кГц. Полный оборот вала равен 360 градусам, если растянуть вращение вала вдоль оси времени, получим синусоиду (1 сигнал) и косинусоиду (2 сигнал) сдвиг между которыми составляет 90 градусов, а их частота равна частоте вращения вала.

На выходе резольвера получаем два синусоидальных сигнала, частота которых равна частоте опорного сигнала резольвера и составляет 8кГц. Амплитуды выходных сигналов пропорциональны положению ротора, 1 и 2 сигналу соответственно.

Для начала смоделируем развертку положения ротора во времени. Данные преобразования осуществляем с помощью S-функции. На вход подадим значение скорости *in_speed*, на выходе получим синусоиду *out_sin* и косинусоиду *out_cos* частота которых равна скорости вращения вала. Так же с помощью S-функции осуществим построение опорного сигнала частотой в 8кГц *out_TTTT*. Так как изменение опорного сигнала происходит 2 раза за период, частота дискретизации S-функции составит 0.0000625с

Назовем S-функцию «resolver». На вход полученной модели при помощи блока Constant будем подавать эталонное значение скорости равное 360 градусов, на выходе мы должны получить 2 сигнала прошедших один полный

период за секунду и отличающихся на 90 градусов. Для вывода координат используем осциллограф «Scope»

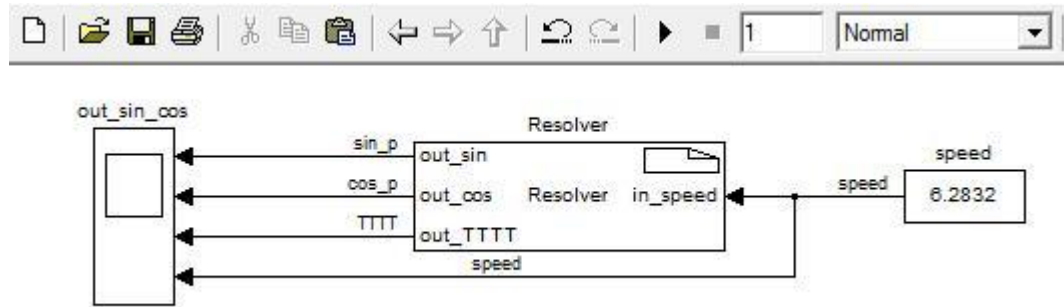


Рисунок 18 – Блок «resolver» имитирующий работу реального резольвера

В закладку Output компонента S-функции вставляем алгоритм управления (объявление переменных и сам алгоритм):[11]

```

/*Блок моделирования перевода скорости в синусоиду и косинусоиду
 * частота которых равна скорости двигателя.*/
//~~~~~
/*Описание переменных. Присвоение начальных значений*/
int static speed = 0; //Входное значение скорость.
int static X = 0; //Значение таймера.
int static sin_signal = 0; //Значения sin-сигнала.
int static cos_signal = 0; //Значения cos-сигнала.
int static shag; //Шаг таймера.
int static TTTT; //Значение опорного сигнала.
int static cc = 0; //Значения счетчика.
//~~~~~
//in-----
/*Присвоение значений входных портов S-функции.*/
//Забираем входной сигнал - скорости двигателя.
speed = in_speed[0];
//in-----
//X-----
/*Моделирование таймера для построения sin и cos сигнала.*/
shag = 0.0000625; //Присваиваем значение шага в таймере.
X = X + shag; //Увеличение значения таймера на shag.
if (X == 1) //Условие, "если таймер X = 1".
    X = 0; //Обнуление таймера.
//X-----
//TTTT-----
/*Моделирование опорного сигнала.
 *Для понижения частоты расчеты применяем счетчик.*/
cc++; //Счетчик, прибавляет единицу за цикл.
if (cc == 1) //Условие, "если счетчик cc = 1".
    {
    TTTT = -1; //Присваиваем значение -1 опорному сигналу.
    }
if (cc == 2) //Условие, "если счетчик cc = 2".
    {
    TTTT = 1; //Присваиваем значение -1 опорному сигналу.
    }

```

```

    cc = 0;          //Обнуление счетчика.
}
//TTTT-----
//sin_&_cos-----
/*Вычисление выходных сигналов sin и cos.*/
sin_signal = 50*sin(X*speed);          //Вычисление значения sin.
cos_signal = 50*sin(X*speed+(3.141592654/2)); //Вычисление значения cos.
//sin_&_cos-----
//out-----
/*Присвоение значений выходных портов S-функции.*/
//Присвоим значение выходному сигналу - sin- скорость.
out_sin[0] = sin_signal;
//Присвоим значение выходному сигналу - cos- скорость.
out_cos[0] = cos_signal;
//Присвоим значение выходному сигналу – опорный сигнал.
out_TTTT[0] = TTTT;
//out-----

```

В данном алгоритме производится моделирование *out_sin* и *out_cos* частота которых должна изменяться пропорционально входному значению *in_speed*. Для начала смоделируем таймер, который будет отвечать за развертку сигналов во времени. Шаг таймера должен быть равен частоте дискретизации S-функции. Обнуляем таймер при достижении 1. Далее моделируем основной синусоидальный сигнал. Под функцию $\sin(x)$ заносим выражение $(X*speed)$ которое будет отвечать за частоту выходящего сигнала. Для увеличения чувствительности и точности системы увеличим амплитуду в 50 раз. Аналогично поступаем с сигналом косинуса.

Далее моделируем опорный сигнал резольвера с частотой 8кГц. Для этого установим счетчик, при помощи которого будем присваивать сигналу значение «-1» в первый цикл расчета и значение «1» во второй период, после чего счетчик будет обнуляться. Так как частота модели 16кГц, а период опорного сигнала формируется за 2 цикла, то на выходе частота опорного сигнала составит требуемые 8кГц.

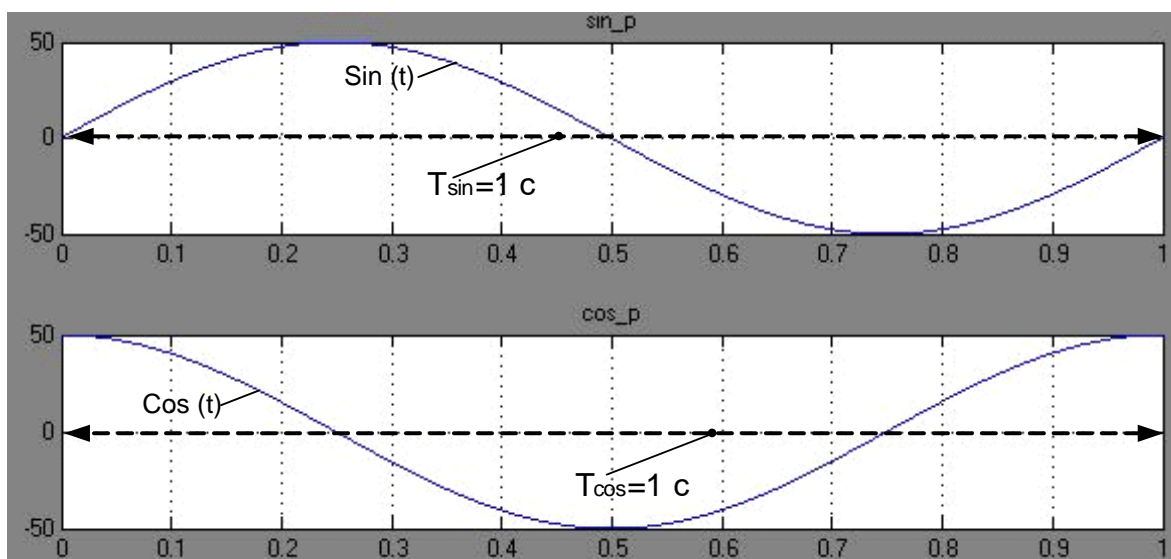


Рисунок 19 – осциллограммы синусного и косинусного сигнала резольвера

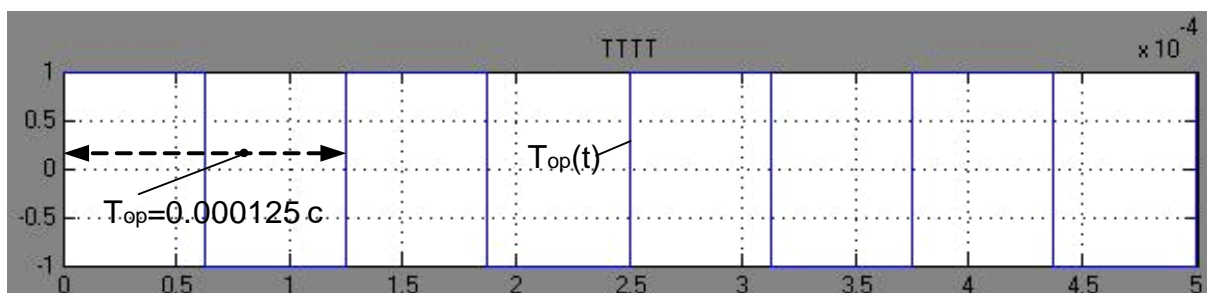


Рисунок 20 – Осциллограмма опорного сигнала резольвера

На графике рисунка 17 получен один полный период за 1 секунду при входном значении в $2 \cdot \pi$. Следовательно, частота отображается корректно.

На графике рисунка 7 получено четыре полных периода за 0.0005 секунды. Следовательно, частота сигнала определяется как $0.0005/4$ и равна 0.000125, что соответствует требуемым 8кГц.

В реальной модели, выход с резольвера представляет собой синусоидальный сигнал частотой 8кГц, смоделируем его при помощи блока «Sine Wave». Что бы частота сигнала на выходе «Sine Wave» равнялась 8кГц, откроем блок и в строке «Frequency» выставим значение 50265.48246(рад/сек), что составляет $8000\text{Гц} \cdot 2\pi$. Сравним опорные сигналы.

При помощи блока «Product» производим умножение опорного сигнала, на сигналы, определяющие положение ротора (см. рисунок 19). На выходе

получаем, требуемый для дальнейших расчетов, сигнал резольвера зависящий от положения ротора.

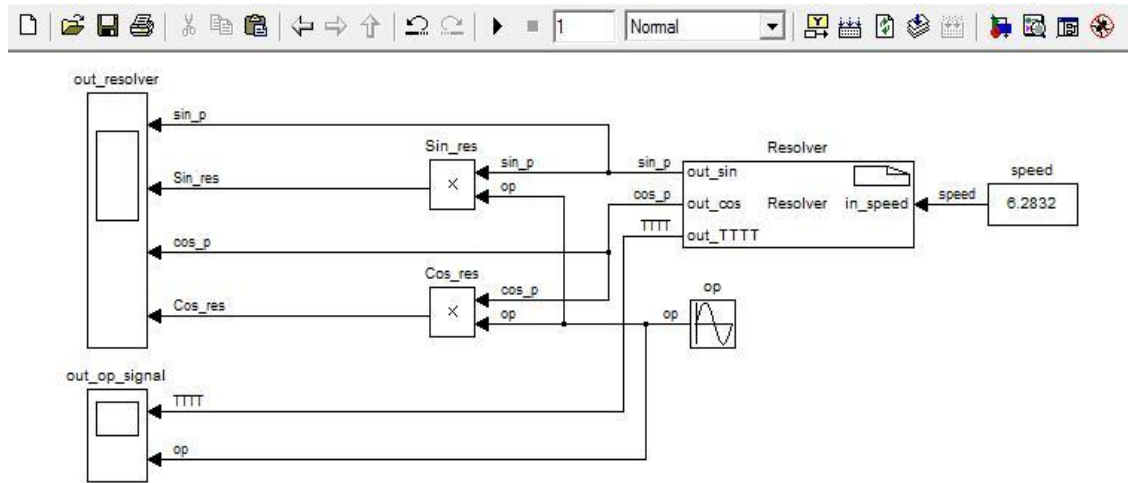


Рисунок 21 – Модель резольвера с выходными сигналами, зависящими от положения ротора

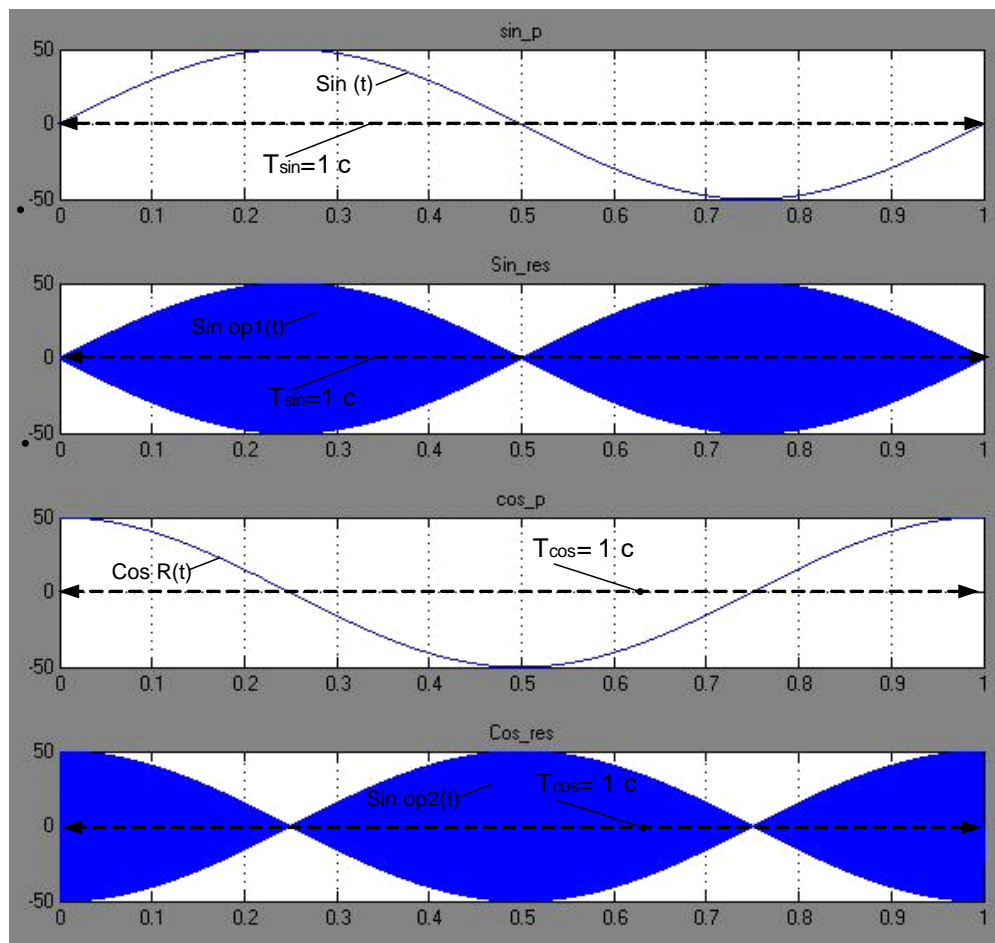


Рисунок 22 – Осциллограммы выходных сигналов с резольвера

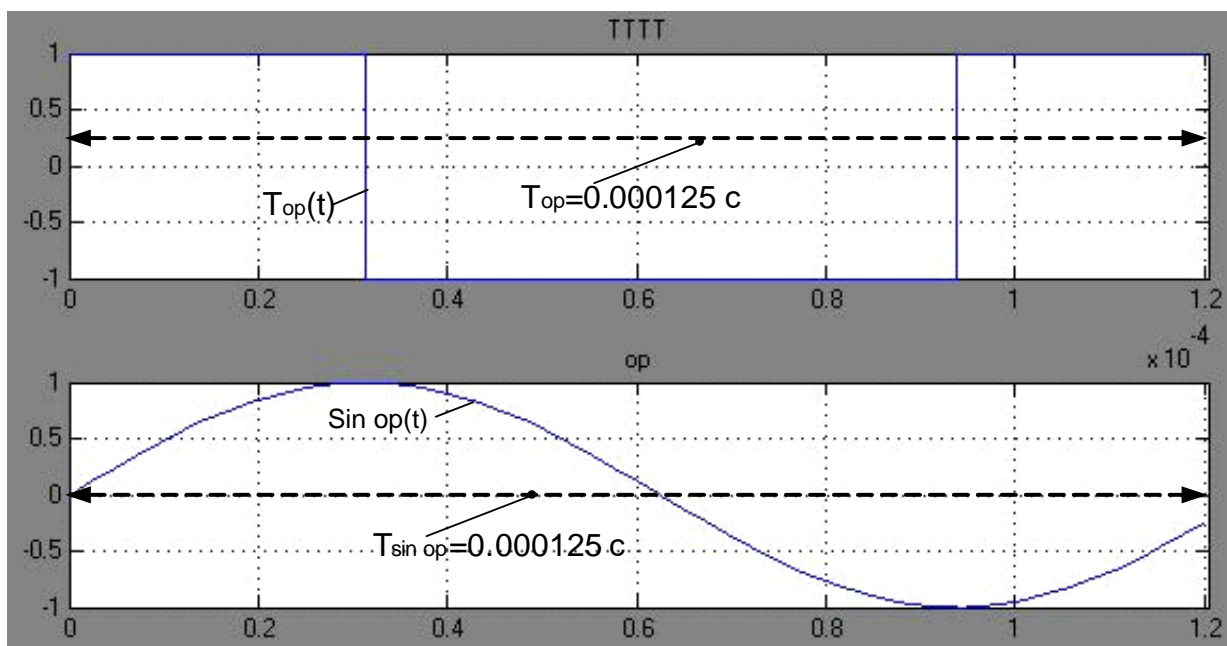


Рисунок 23 – Сравнение опорных сигналов

Из графиков на рисунке 22 видно, что модель работает правильно. По графикам рисунка 23 видно, что опорные сигналы совпадают по частоте и периоду. Следовательно, преобразования выполнены правильно.

1.4.6 Реализация модели декодера.

Полученный сигнал резольвера необходимо декодировать и вычислить положение ротора. Для этого построим огибающие по сигналам с резольвера, и восстановим первоначальные функций синуса и косинуса. Потом зная значение синуса и косинуса, мы сможем высчитать тангенс угла и далее через арктангенс выразить сам угол.

Для преобразований используем S-функцию. На вход будем подавать сигналы с резольвера частотой 8кГц in_sin_res и in_cos_res . На выходе получим значение четверти out_ch и угла out_ugol положения вала. Так же для построения контрольных графиков подадим на выход верхние и нижние огибающие для синуса (out_sinH , out_sinL) и косинуса (out_cosH , out_cosL). Для сравнения результирующего сигнала выведем out_signal_sin и out_signal_cos . Частота дискретизации как и в блоке «resolver» равна 0.0000625. Присвоим название S-функции «R_15».

На входы полученной S-функции подаем сигналы с выходов S-функции «resolver». Выходы «R_15» подключим к осциллографу .

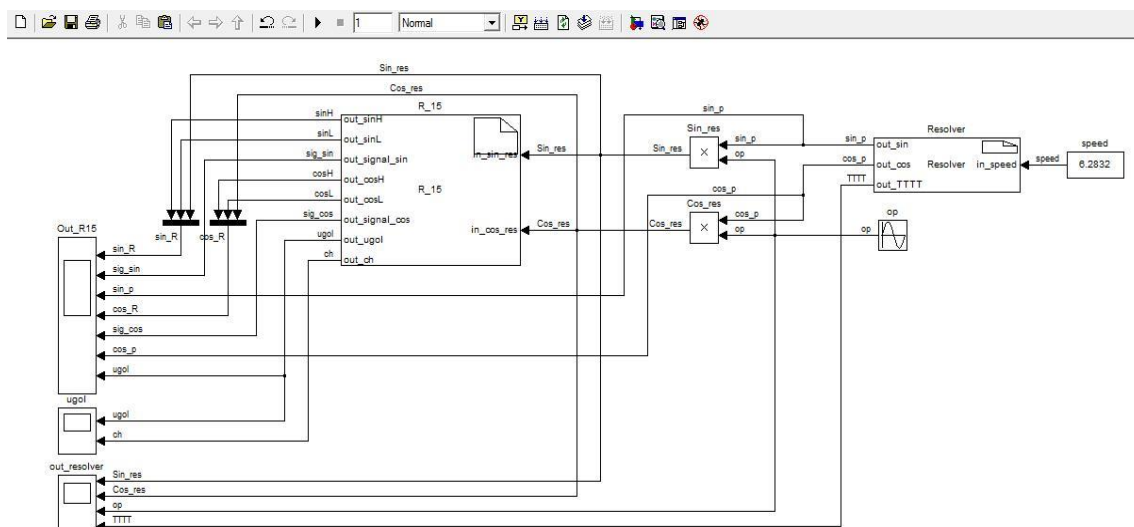


Рисунок 24 – Модель резольвера с декодером

В закладку Output компонента S-функции вставляем алгоритм управления (объявление переменных и сам алгоритм):

*/*Блок вычисления угла и четверти поворота двигателя по данным с резольвера.*/**

//~~~~~

*/*Описание переменных. Присвоение начальных значений*/*

```
int static sin_res = 0; //Значение sin- сигнала с резольвера.
int static cos_res = 0; //Значение cos- сигнала с резольвера.
int static signal_sin = 0; //Восстановленная sin- скорость.
int static signal_cos = 0; //Восстановленная cos- скорость.
int static S11 = 0; //Значение sin- сигнала с резольвера, верхний пик.
int static S12 = 0; //Значение sin- сигнала с резольвера, нижний пик.
int static C11 = 0; //Значение cos- сигнала с резольвера, верхний пик.
int static C12 = 0; //Значение cos- сигнала с резольвера, нижний пик.
int static ch = 0; //Четверть в которой находится двигатель.
int static P = 1; //Счетчик, синхронизация с опорным сигналом.
int tgA = 0; //Тангенс угла.
int at = 0; //Арктангенс угла. Угол в радианах
int A = 0; //Значение угла в градусах.
```

//~~~~~

//in-----

*/*Присвоение значений входных портов S-функции.*/**

//Забираем входной сигнал sin с резольвера.

sin_res = (in_sin_res[0]);

//Забираем входной сигнал cos с резольвера.

cos_res = (in_cos_res[0]);

//in-----

//signal-----

*/*Построение огибающих.*

Для синхронизации с опорным сигналом применяем счетчик.*/

P++; //Счетчик, прибавляет единицу за цикл.

```

if (P == 1)          //Условие, "если счетчик P = 1".
{
    S11 = sin_res;    //Снимаем сигнал с верхних пиков сигнала sin_res.
    C11 = cos_res;    //Снимаем сигнал с верхних пиков сигнала cos_res.
}
if (P == 2)          //Условие, "если счетчик P = 2".
{
    S12 = sin_res;    //Снимаем сигнал с нижних пиков сигнала sin_res.
    C12 = cos_res;    //Снимаем сигнал с нижних пиков сигнала cos_res.
    P = 0;            //Обнуления счетчика.
}
/*Восстановление исходной скорости*/
signal_sin = ((S12-S11)/2); //Вычисление среднего значения sin- сигнала.
signal_cos = ((C12-C11)/2); //Вычисление среднего значения cos- сигнала.
//signal-----
//ugol-----
/*Вычисление угла.*/
tgA = ((signal_sin)/(signal_cos)); //Вычисляем tg угла.
at = atan(tgA);           //Вычисляем значение угла в радианах.
A = ((at*180)/3.1415);     //Переводим значение угла в градусы.
/*Уменьшаем период с 1/2 оборота (pi) до 1/4 оборота (pi/2).*/
if (A <= 0)               //Условие, "если угол меньше или равен 0".
    A = A + 90;           //Увеличиваем значение угла на 90 градусов.
if (A > 90) A = 90;       //Верхнее ограничение значения угла.
if (A < 0) A = 0;        //Нижнее ограничение значения угла.
//ugol-----
//ch-----
/*Вычисление четверти.*/
if ((signal_sin > 0) && (signal_cos >= 0)) //Условие 1 четверти.
    ch = 1;                //Объявление значения 1 четверти.
if ((signal_sin >= 0) && (signal_cos < 0)) //Условие 2 четверти.
    ch = 2;                //Объявление значения 2 четверти.
if ((signal_sin < 0) && (signal_cos < 0)) //Условие 3 четверти.
    ch = 3;                //Объявление значения 3 четверти.
if ((signal_sin <= 0) && (signal_cos >= 0)) //Условие 4 четверти.
    ch = 4;                //Объявление значения 4 четверти.
//ch-----
//out-----
/*Присвоение значений выходных портов S-функции.*/
//Присвоим значение выходному сигналу - верхнего пика sin.
out_sinH[0] = S11;
//Присвоим значение выходному сигналу - нижнего пика sin.
out_sinL[0] = S12;
//Присвоим значение выходному сигналу - исходной скорости sin.
out_signal_sin[0] = signal_sin;
//Присвоим значение выходному сигналу - верхнего пика cos.
out_cosH[0] = C11;
//Присвоим значение выходному сигналу - нижнего пика cos.
out_cosL[0] = C12;
//Присвоим значение выходному сигналу - исходная скорости cos.
out_signal_cos[0] = signal_cos;
//Присвоим значение выходному сигналу - значение угла в градусах.
out_ugol[0] = A;
//Присвоим значение выходному сигналу - четверть оборота.
out_ch[0] = ch;
//out-----

```

Первый раздел алгоритма отвечает за построение верхней и нижней огибающих для сигналов. Зная время генерации пиков опорной синусоиды, мы настраиваем систему таким образом, что бы сохранять значение амплитуды пиковых значений входного сигнала. Настройку производим при помощи счетчика «Р». Таким образом, мы получаем для значения синуса и косинуса по 2 огибающих, верхняя и нижняя. Получим исходное значение сигнала, вычислив среднее значение между огибающими. В следующем разделе производится вычисление позиции вала. Для этого найдем разделив сигнал синус на сигнал косинус, получим тангенс угла. Далее через арктангенс выражаем значение угла и делим период на 4 четверти. Для удобства переводим значение угла в градусы. В последнем разделе определяем четверть.

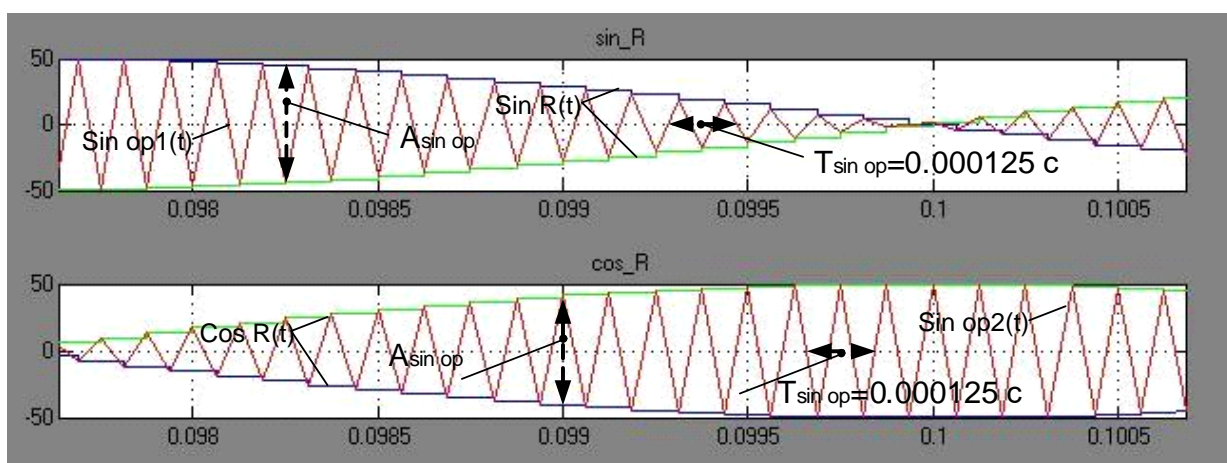


Рисунок 25 – Построение огибающих для сигналов с резольвера

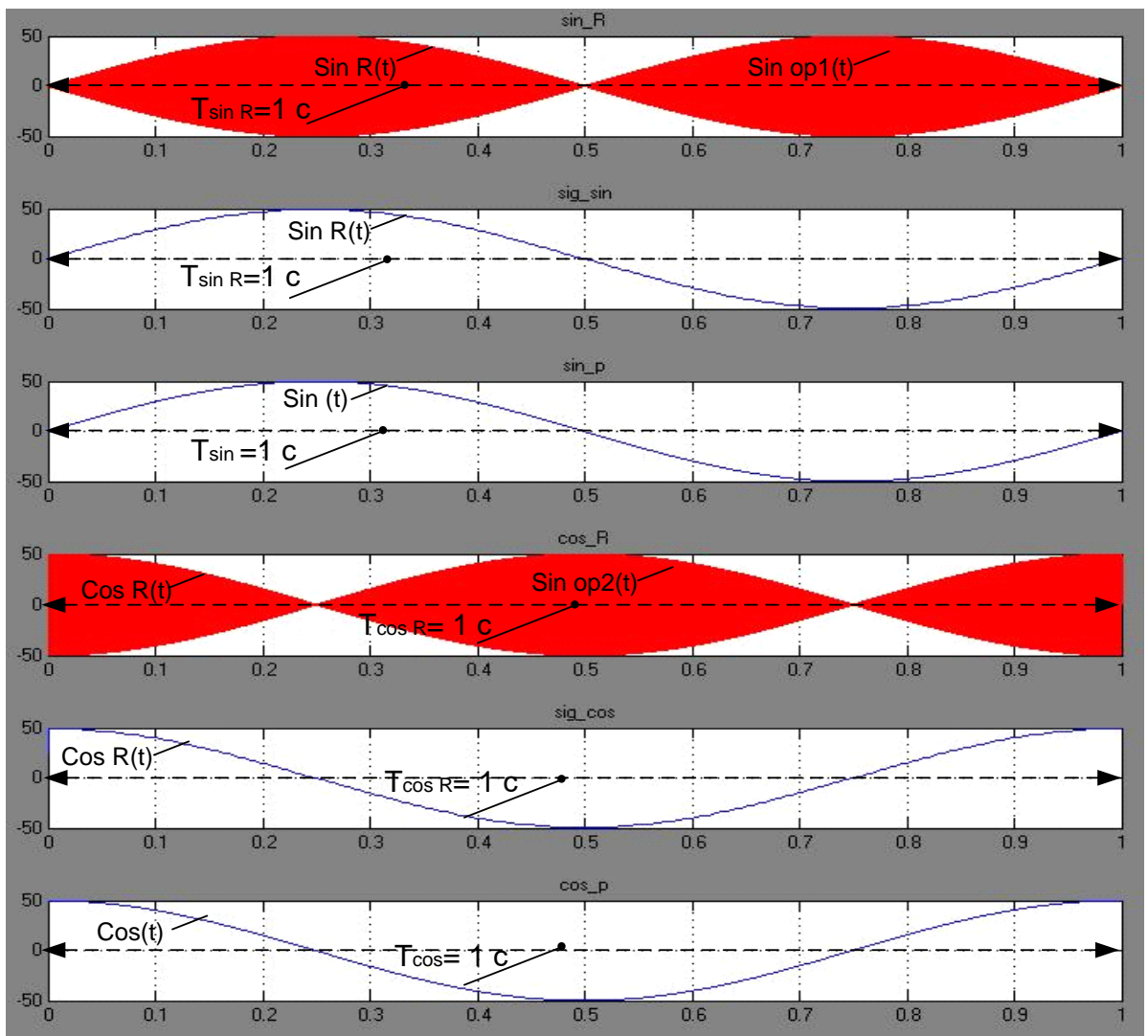


Рисунок 26 – Осциллограммы выходных сигналов с резольвера

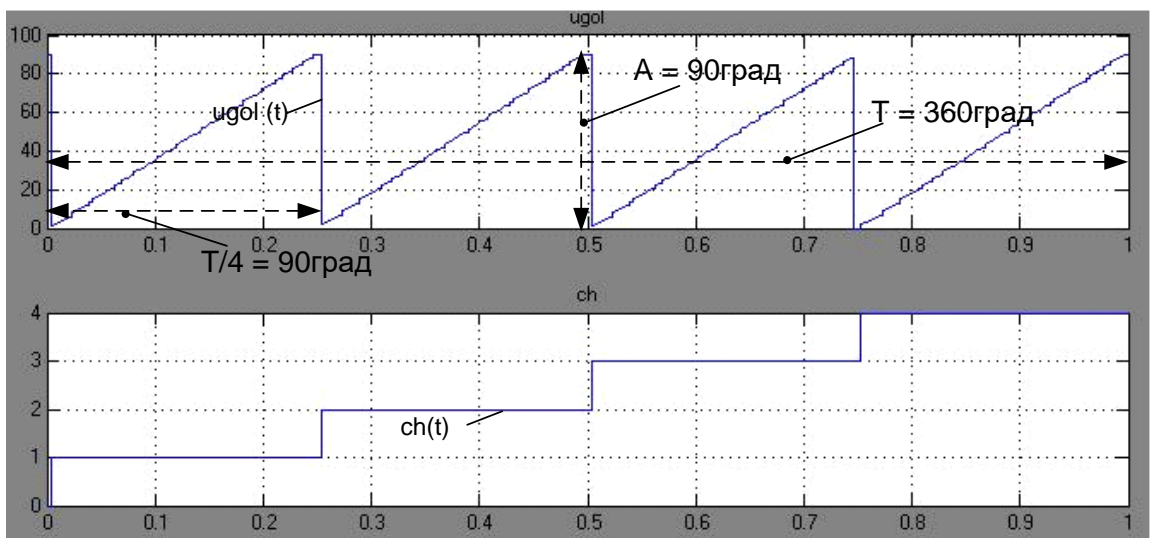


Рисунок 27 – Осциллограммы сигналов градуса поворота ротора и определения четверти поворота

1.4.7 Математическое описание регуляторов

ПИ-регулятор обычно представляется следующей передаточной функцией

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = k_n + \frac{k_n}{T_u \cdot p}. \quad (26)$$

Для цифровой реализации ПИ-регулятора необходимо это уравнение дискретизировать, т.е. перейти к конечно-разностной форме и решить его. Для этого выполним следующие действия[12]

Выразим $y(p)$ из уравнения (26)

$$y(p) = k_n \cdot x(p) + \frac{k_n \cdot x(p)}{T_u \cdot p}; \quad (27)$$

Применим обратное преобразование Лапласа

$$y(t) = k_n \cdot x(t) + \frac{k_n \cdot \int x(t) dt}{T_u}; \quad (28)$$

Продифференцируем обе части уравнения

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_n \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \frac{k_n \cdot x(t)}{T_u}; \quad (29)$$

Теперь запишем уравнение в дискретном виде

$$\frac{y_k - y_{k-1}}{T} = k_n \cdot \frac{x_k - x_{k-1}}{T} + \frac{k_n \cdot x_k}{T_u}; \quad (30)$$

Выразим y_k

$$y_k = y_{k-1} + x_k \left(k_n + \frac{k_n \cdot T}{T_u} \right) - k_n \cdot x_{k-1}; \quad (31)$$

где T_u – интегрирующая постоянная времени,

T – время расчета регулятора,

k_n – пропорциональный коэффициент.

1.4.8 Разработка регуляторов тока

Следующим шагом были разработаны ПИ регуляторы тока по осям d и q.

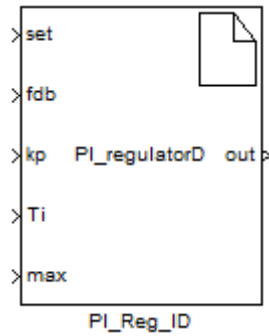


Рисунок 28 - Внешний вид регулятора тока по оси D

Регуляторы были разработаны на базе S-функции. Код регулятора тока

по оси D:[13]

```
int static k0;
int static k1;
int static uk;
int static uk_1=0;
int static T;
uk = set[0]-fdb[0];
k1=kp[0];
k0 = kp[0] + T/Ti[0];
out[0] = out[0] + k0*uk - k1*uk_1;
uk_1 = uk;
if (out[0] > max[0]) out[0] = max[0];
if (out[0] < (-max[0])) out[0] = -max[0];
```

Код регулятора тока по оси Q:

```
int static k0;
int static k1;
int static uk;
int static uk_1=0;
int T;
T=0.000016;
uk = set[0] - fdb[0];
k1=kp[0];
k0 = kp[0] + T/Ti[0];
out[0] = out[0] + k0*uk - k1*uk_1;
uk_1 = uk;
if (out[0] > max[0]) out[0] = max[0];
if (out[0] < (-max[0])) out[0] = -max[0];
```

Модель системы управления СДПМ представлена на рисунке 29.

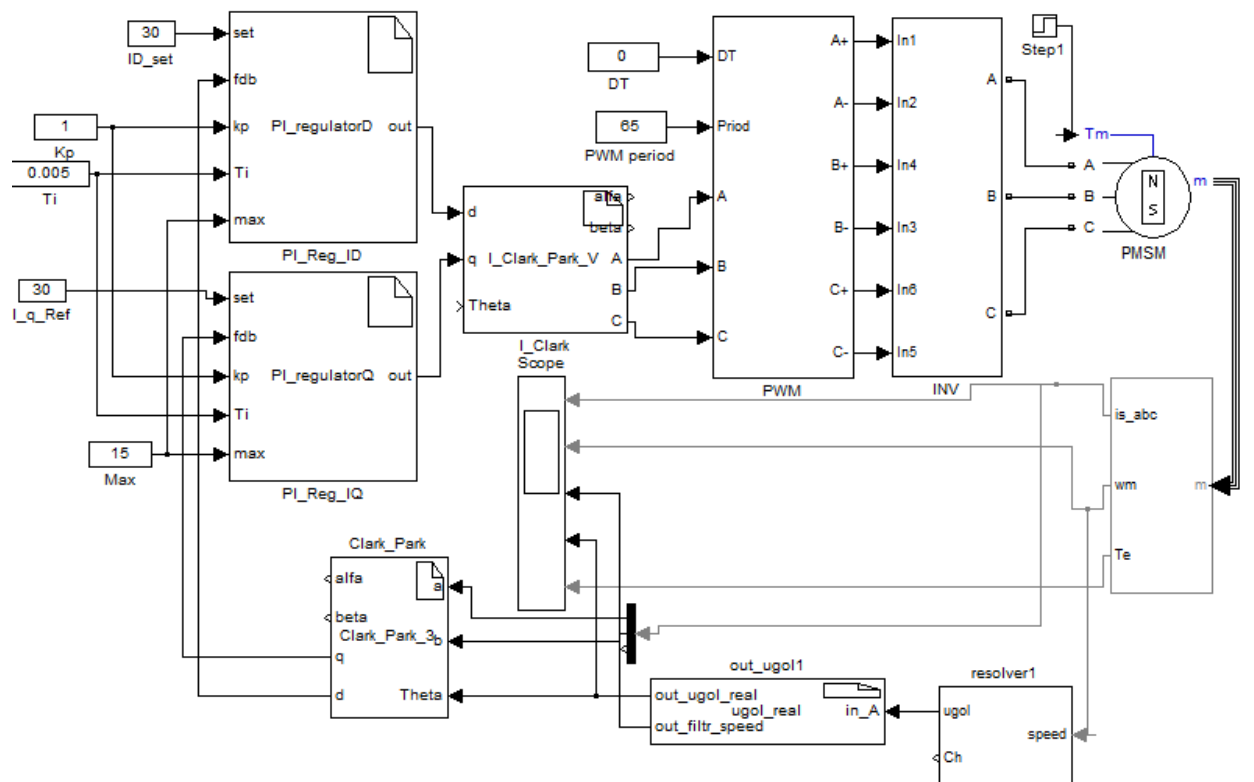


Рисунок 29 – Модель системы управления СДПМ

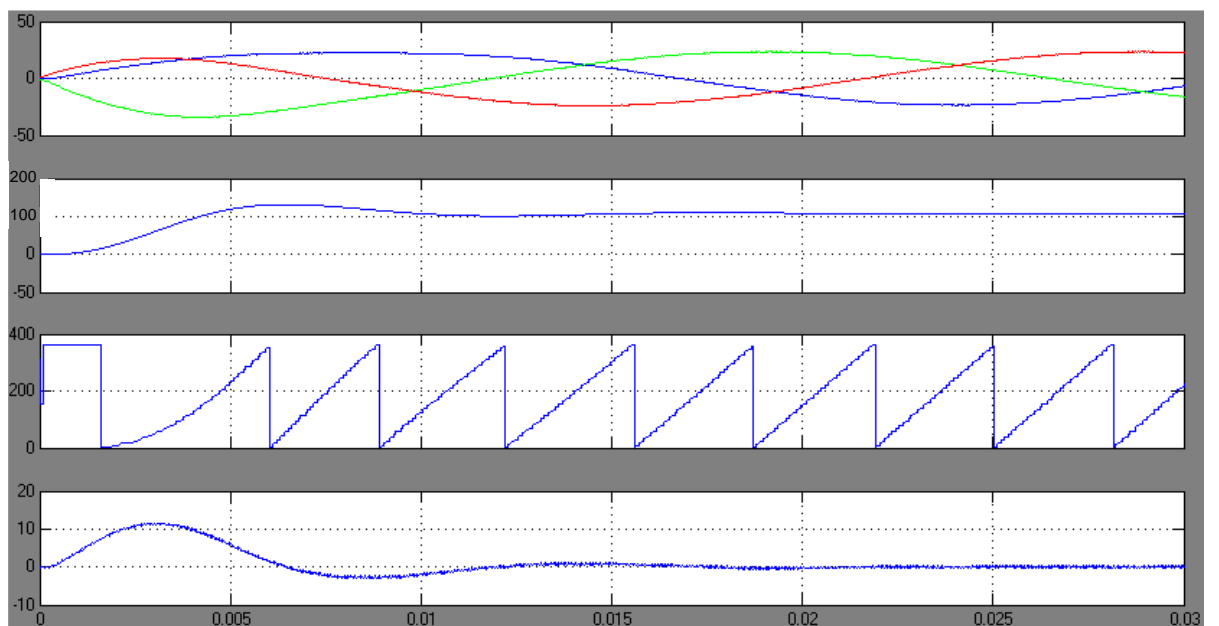
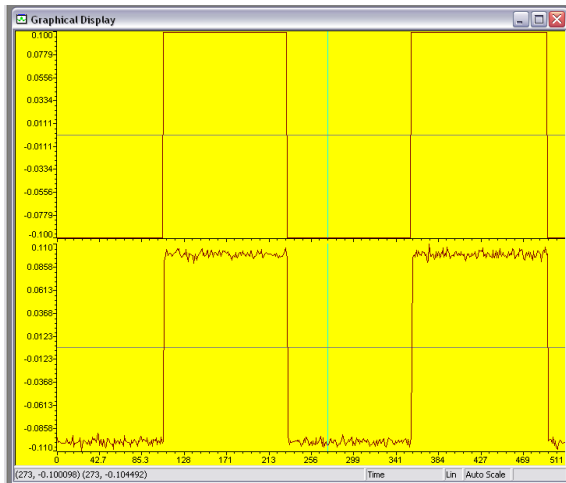


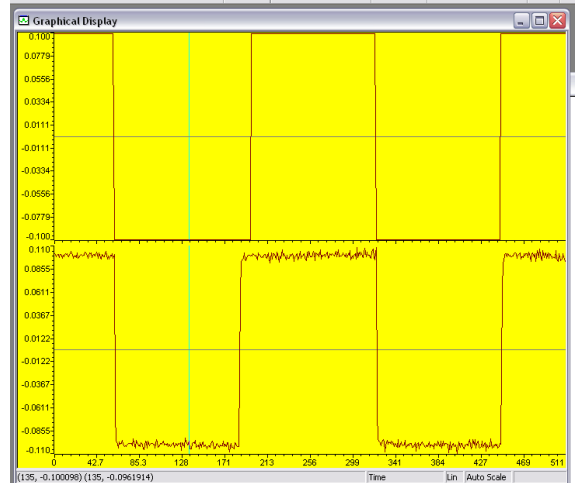
Рисунок 30 – Переходные процессы модели, представленной на рисунке

Проверка правильности проделанной оптимизации выполнялась на базе представленного электропривода с синхронным электродвигателем на постоянных магнитах. На рисунках 30 и 31 представлены полученные результаты в виде графиков переходных процессов в контуре тока при ступенчатом и синусоидальном сигналах задания для различных частот.

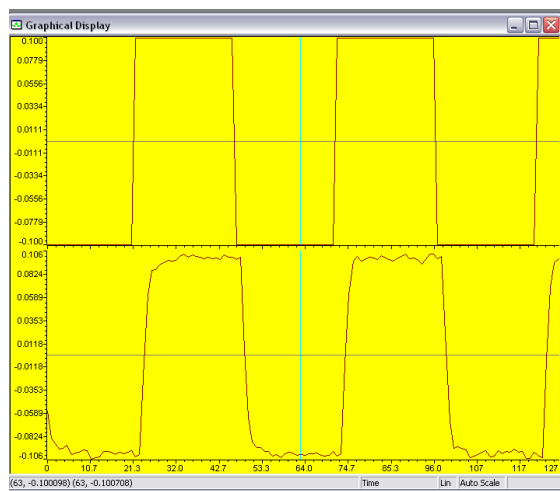
При выполнении экспериментальных исследований задающее воздействие формировалось встроенным программным генератором сигналов с дискретностью, соответствующей частоте обработки контура тока, 5 кГц. Амплитуда управляющих воздействий принималась исходя из стремлений обеспечения линейного режима работы без ограничений выходных сигналов.



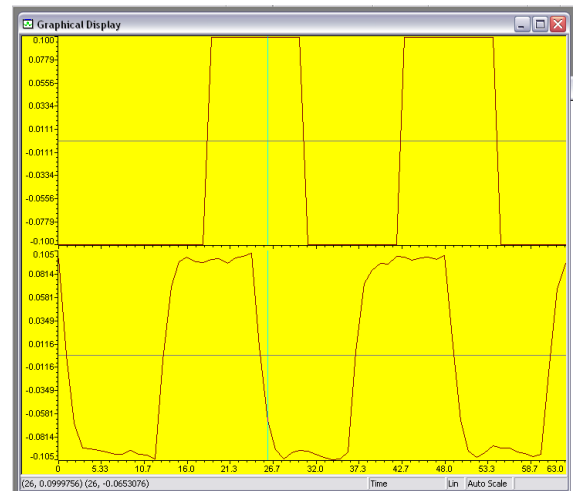
1 Гц



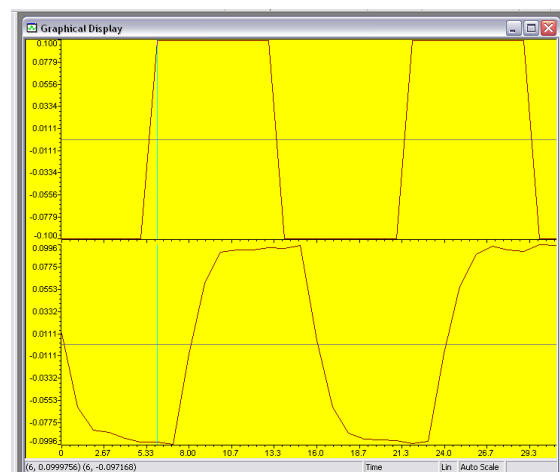
10 Гц



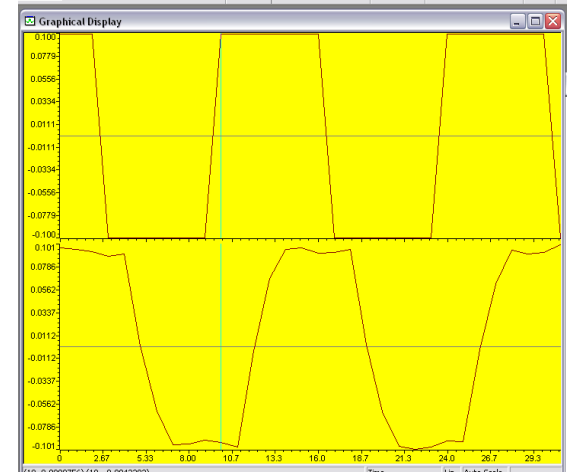
100 Гц



200 Гц

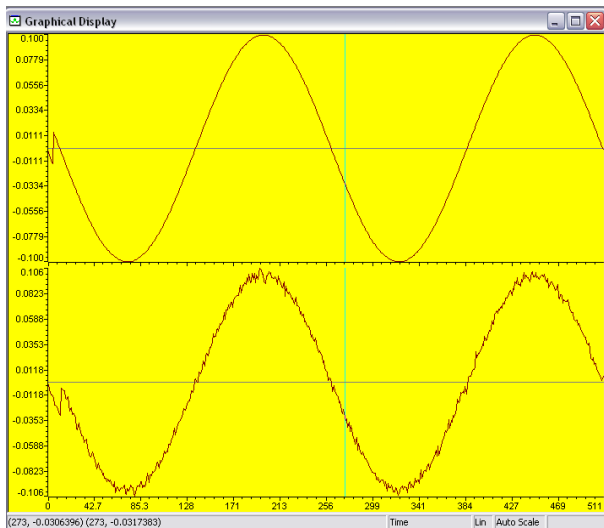


300 Гц

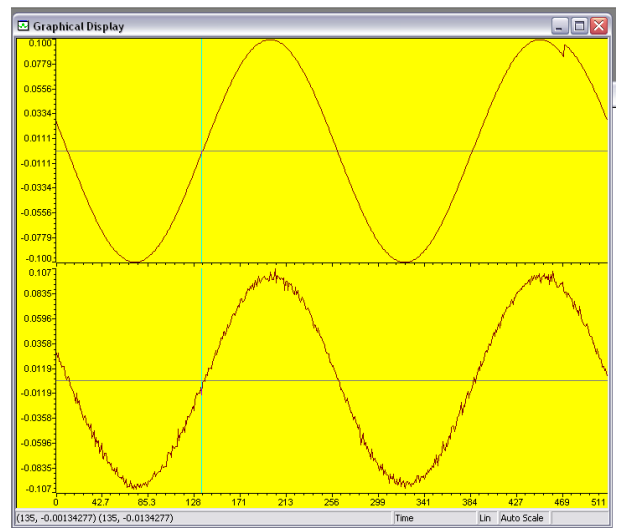


340 Гц

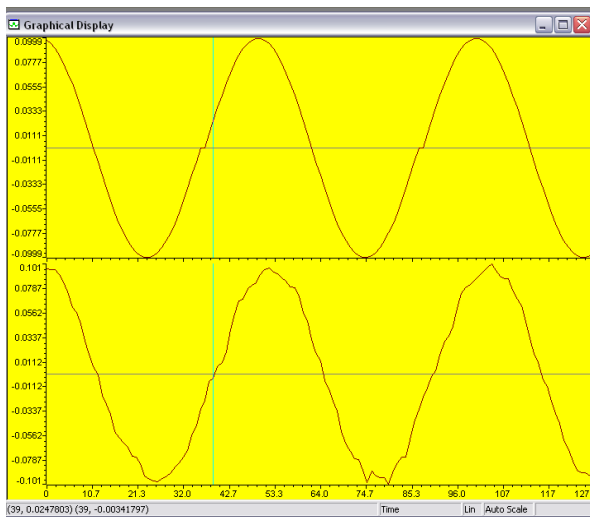
Рисунок 30 - Переходные процессы при ступенчатом сигнале задания в контуре тока



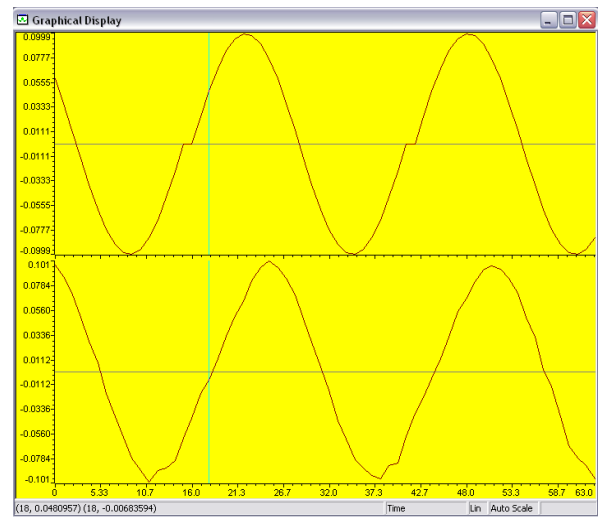
1 Гц



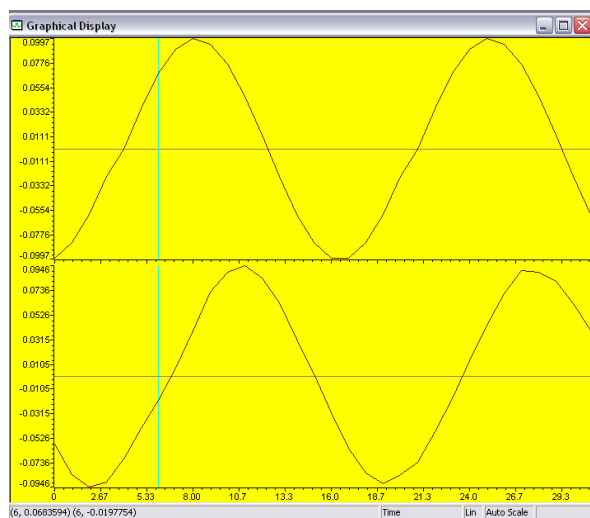
10 Гц



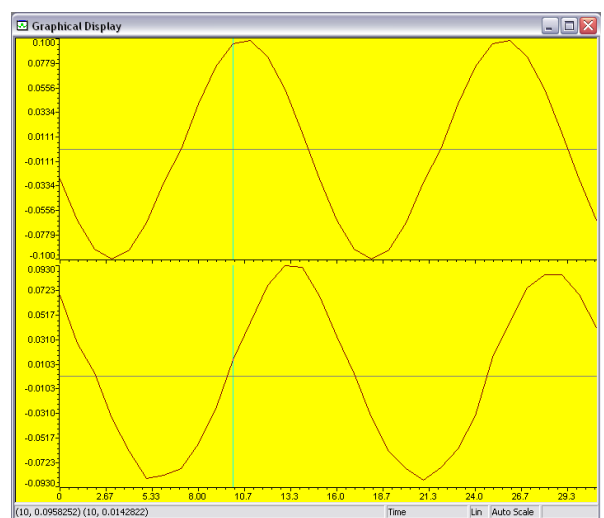
100 Гц



200 Гц



300 Гц



340 Гц

Рисунок 31 - Переходные процессы при синусоидальном сигнале задания в контуре тока

При анализе результатов экспериментальных исследований было выявлено некоторое увеличение времени переходного процесса и снижение полосы пропускания контура тока в сравнении с ожидаемыми показателями. Данный факт обусловлен влиянием конечной дискретизации управляющих воздействий, формируемых системой управления, а также влиянием инерционностей координатных преобразований и цепей измерений тока в каналах обратных связей.[14]

Предложенный способ позволяет выполнить настройку параметров регулятора контура тока для реальной системы, используя в качестве расчётной основы параметры любого применяемого в системе электродвигателя.

1.4.9 Разработка регулятора скорости

Следующим этапом был разработан ПИ регулятор скорости на базе S-функции. Код регулятора представлен ниже:

```
int static k0;  
int static k1;  
int static uk;  
int static uk_1=0;  
  
uk = set[0]-fdb[0];  
k1=kp[0];  
k0 = kp[0] + T/Ti[0];  
out[0] = out[0] + k0*uk - k1*uk_1;  
uk_1 = uk;  
  
if (out[0] > max[0]) out[0] = max[0];  
if (out[0] < (-max[0])) out[0] = -max[0];
```

Модель системы управления СДПМ с использованием приведенных выше регуляторов представлена на рисунке 32, а результаты моделирования – на рисунке 33.[15]

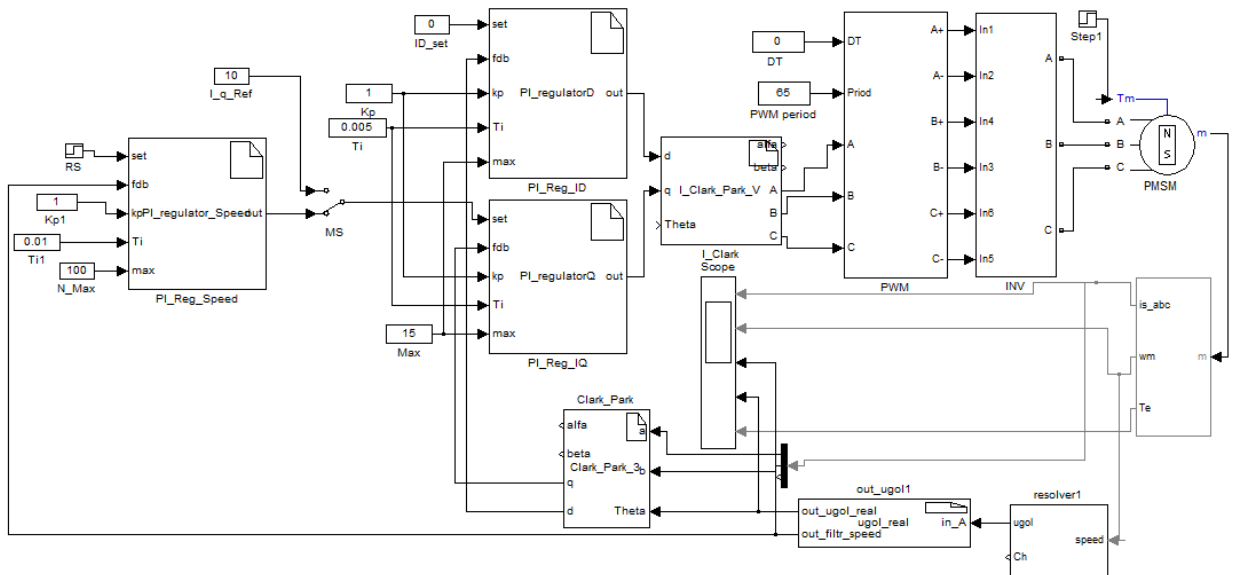


Рисунок 32 – Имитационная модель системы управления СДПМ

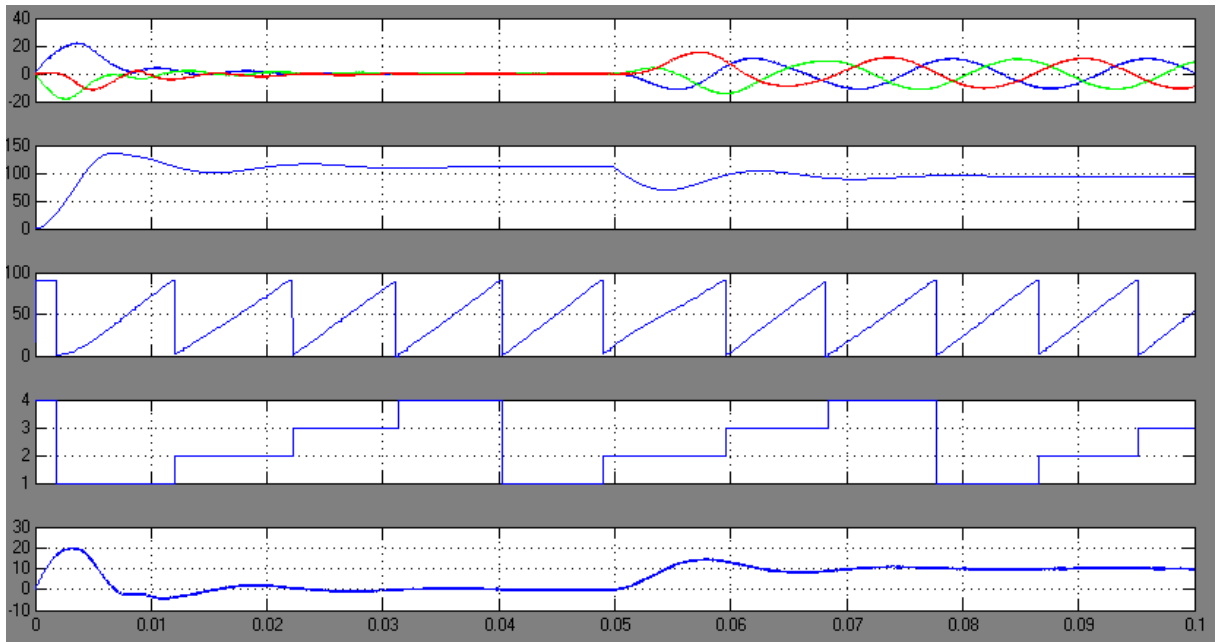
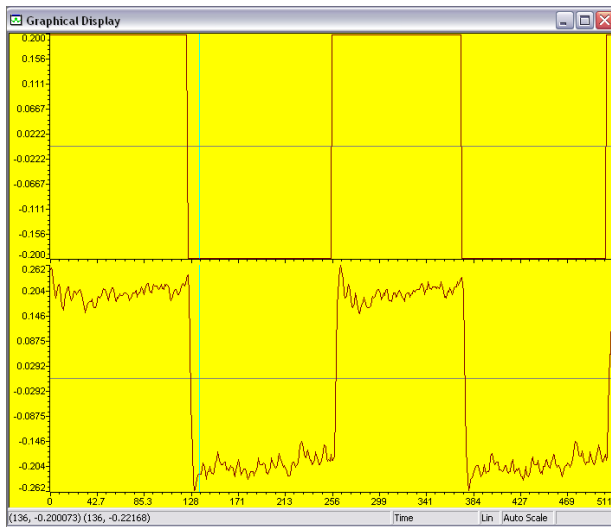


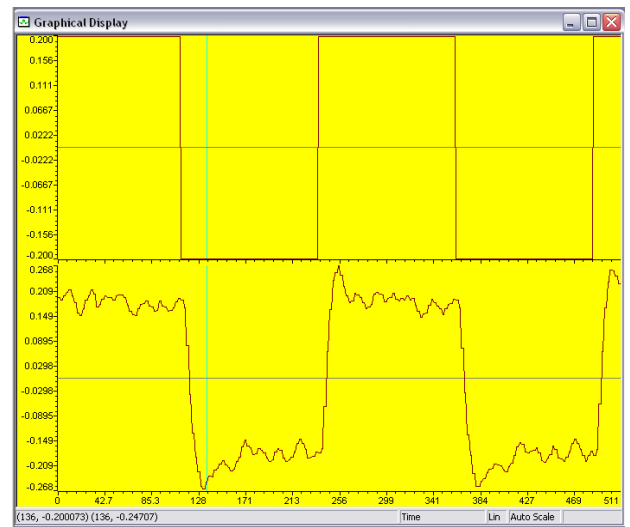
Рисунок 33 – Переходные процессы модели, представленной на рисунке 17, при задании на скорость=110 Рад\с.

Проверка правильности проделанной оптимизации выполнялась на базе представленного электропривода с синхронным электродвигателем на постоянных магнитах. На рисунках 34 и 35 представлены полученные результаты в виде графиков переходных процессов в контуре тока при ступенчатом и синусоидальном сигналах задания для различных частот.

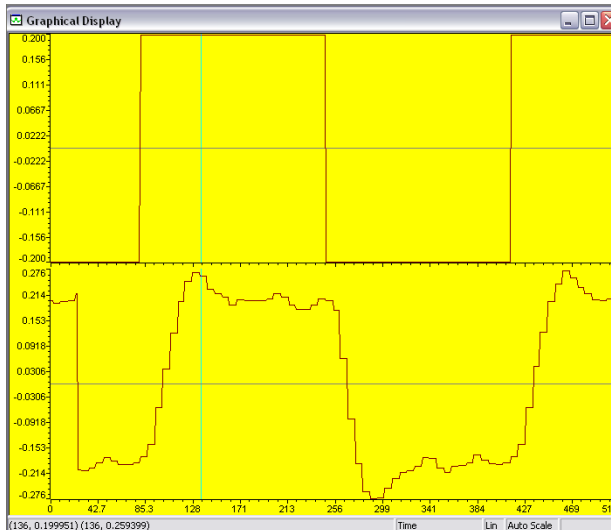
При выполнении экспериментальных исследований задающее воздействие формировалось встроенным программным генератором сигналов с дискретностью, соответствующей частоте обработки контура скорости, 250 Гц. Амплитуда управляющих воздействий принималась исходя из стремления обеспечить линейный режим работы системы.



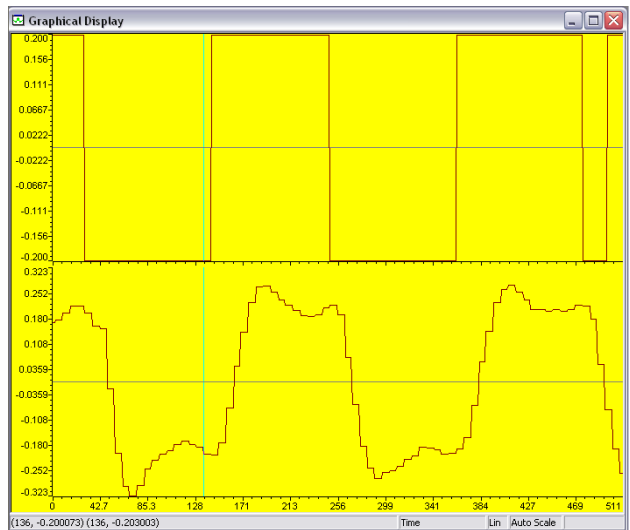
1 Гц



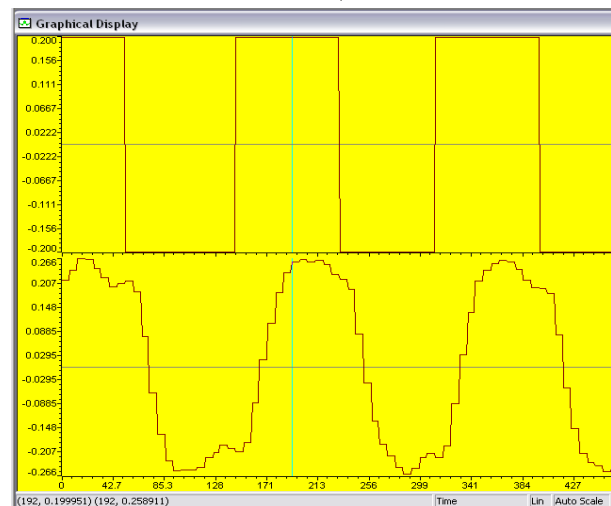
2,5 Гц



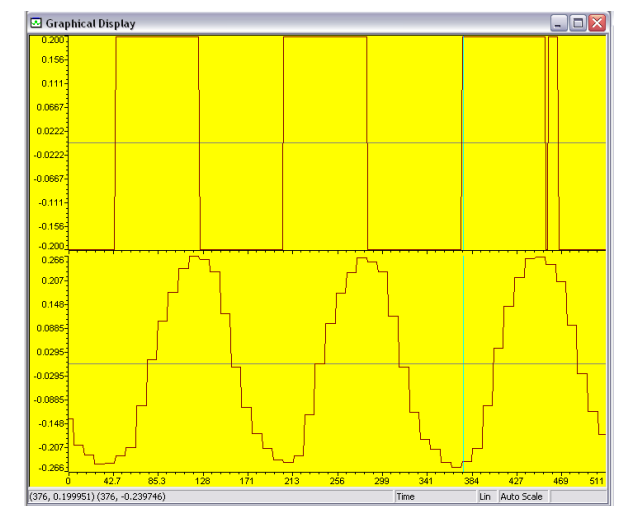
5 Гц



7,5 Гц

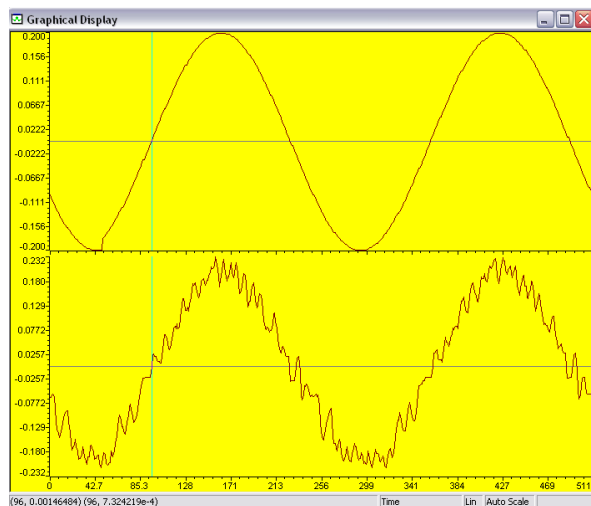


10 Гц

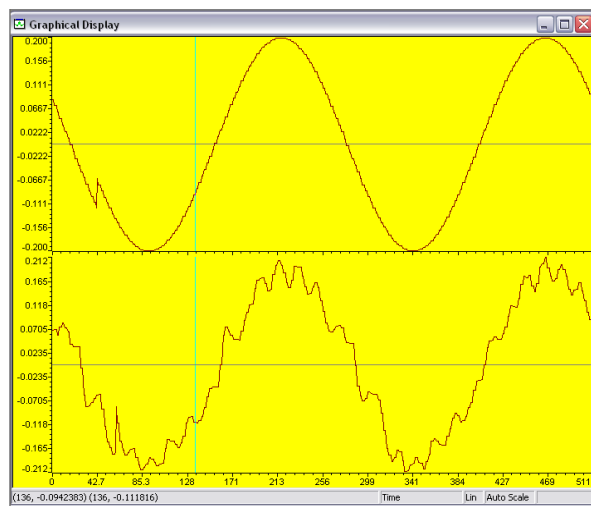


15 Гц

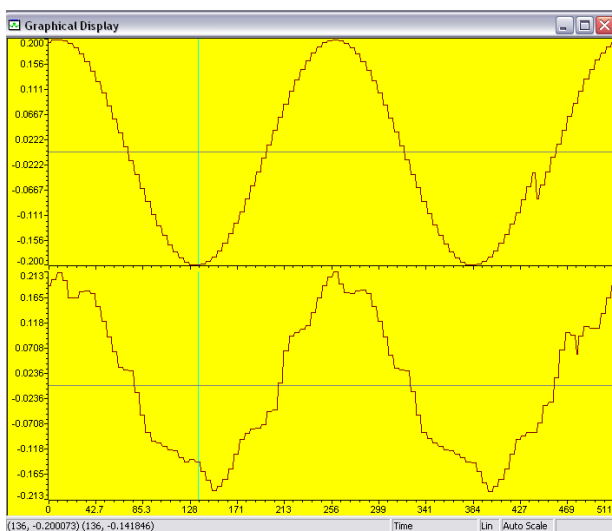
Рисунок 34 - Переходные процессы при ступенчатом сигнале задания в контуре скорости



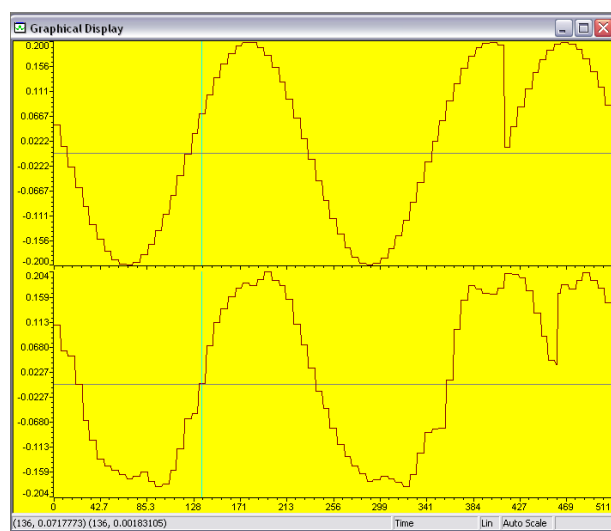
1 Гц



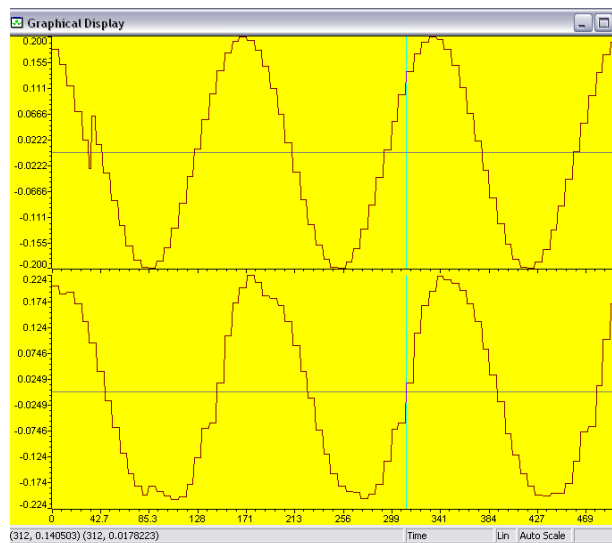
2,5 Гц



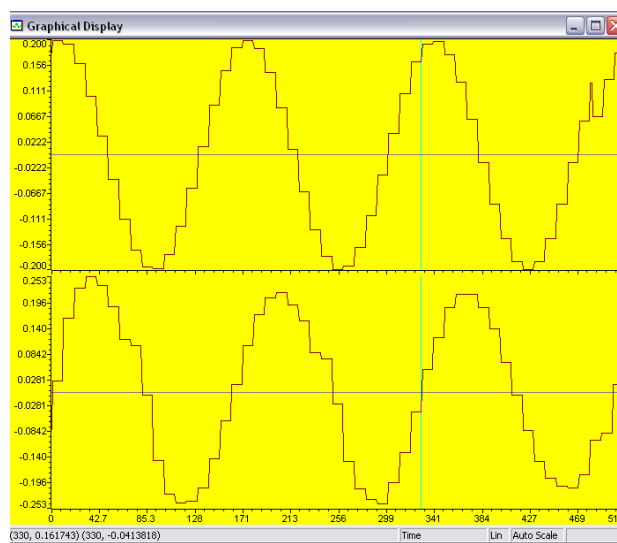
5 Гц



7,5 Гц



10 Гц



15 Гц

Рисунок 35 - Переходные процессы при синусоидальном сигнале задания в контуре скорости

При анализе результатов экспериментальных исследований контура скорости было выявлено некоторое уменьшение времени переходного процесса с одновременным увеличением полосы пропускания контура скорости в сравнении с ожидаемыми показателями. Данный факт объясняется допущениями, принятыми в процессе оптимизации и влиянием конечной дискретизации расчётов в контуре скорости.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ

2.1 Преобразование расчетов в IQ-математику

Разработанная на данном этапе модель является максимально приближенной к идеальной, для проведения исследований системы управления я в своей работе применил IQ-математику, которая позволяет максимально приблизить имитационную модель к реальной системе управления на основе DSP. Образец перехода на IQ математику(на примере регулятора тока представлен ниже):

```
ID.Kp=_IQ(0.5);
PID.Ki=_IQ(dt/0.002);
PID.Kd=_IQ(0/dt);
PID.Kc=_IQ(1);
PID.OutMax=_IQ(50);
PID.OutMin=_IQ(-50);
PID.Ref=Ref[0];
PID.Fdb=Fdb[0];
PID.calc(&PID);
out[0]=PID.Out;
```

Код расчета самого регулятора при этом находится в header-файле, который подключается в качестве библиотеки. [16,17]

```
#ifndef __PIDREG3_H__
#define __PIDREG3_H__
#include ".\include\IQmathLib.h"
#include ".\include\dmctype.h"

typedef struct { _iq Ref; // Вход для сигнала задания
                _iq Fdb; // Вход для сигнала обратной связи
                _iq Err; // Переменная: ошибка
                _iq Kp; // Коэффициент пропорциональности регулятора
                _iq Up; // Пропорциональная составляющая (выход)
                _iq Ui; // Интегральный вход
                _iq Ud; // Дифференциальный вход
                _iq OutPreSat; // Выход сигнала предварительного усиления
                _iq OutMax; // Максимальный уровень выходного сигнала
                _iq OutMin; // Минимальный уровень выходного сигнала
                _iq Out; // Основной выход сигнала ПИД-регулятора
                _iq SatErr; // Ошибка: регулятор вошел в насыщение
                _iq Ki; // Интегральное усиление
```

```

    _iq Kc;                // Интегральное корректирующее усиление
    _iq Kd;                // Дифференциальное усиление
    void (*calc)();        // Указатель на функцию вычисления
} PIDREG3;
typedef PIDREG3 *PIDREG3_handle;
/*-----
Стандартные параметры регулятора
-----*/
#define PIDREG3_DEFAULTS { 0, \ 0, \ 0, \ _IQ(1.3), \ 0, \ 0, \ 0, \ 0, \ _IQ(1), \ _IQ(-1), \ 0, \ 0, \
_IQ(0.02), \ _IQ(0.5), \ _IQ(1.05), \ 0, \ (void (*)(Uuint32))pid_reg3_calc }
void pid_reg3_calc(PIDREG3_handle);
#endif // __PIDREG3_H__
// #include "IQmathLib.h"
GLOBAL_Q in "IQmathLib.h" file
// #include "dmctype.h"
// #include "pid_reg3.h"
void pid_reg3_calc(PIDREG3 *v)
{
    // Вычисление ошибки
    v->Err = v->Ref - v->Fdb;
    // Расчет пропорциональной составляющей
    v->Up = _IQmpy(v->Kp, v->Err);
    // Расчет интегральной составляющей
    v->Ui = v->Ui + _IQmpy(v->Ki, v->Up) + _IQmpy(v->Kc, v->SatErr);
    // Расчет дифференциального выхода
    v->Ud = _IQmpy(v->Kd, (v->Up - v->Up1));
    // Расчет предусилительного сигнала
    v->OutPreSat = v->Up + v->Ui + v->Ud;
    // Расчет насыщения
    if (v->OutPreSat > v->OutMax)
        v->Out = v->OutMax;
    else if (v->OutPreSat < v->OutMin)
        v->Out = v->OutMin;
    else
        v->Out = v->OutPreSat;
    // Сравнение насыщения с максимумом для вычисления наличия ошибки.
    v->SatErr = v->Out - v->OutPreSat;
}

```

Таким образом, все блоки переводятся в режим расчета IQ, визуально модель при этом не меняется, переходные процессы при IQ-расчетах представлены ниже:

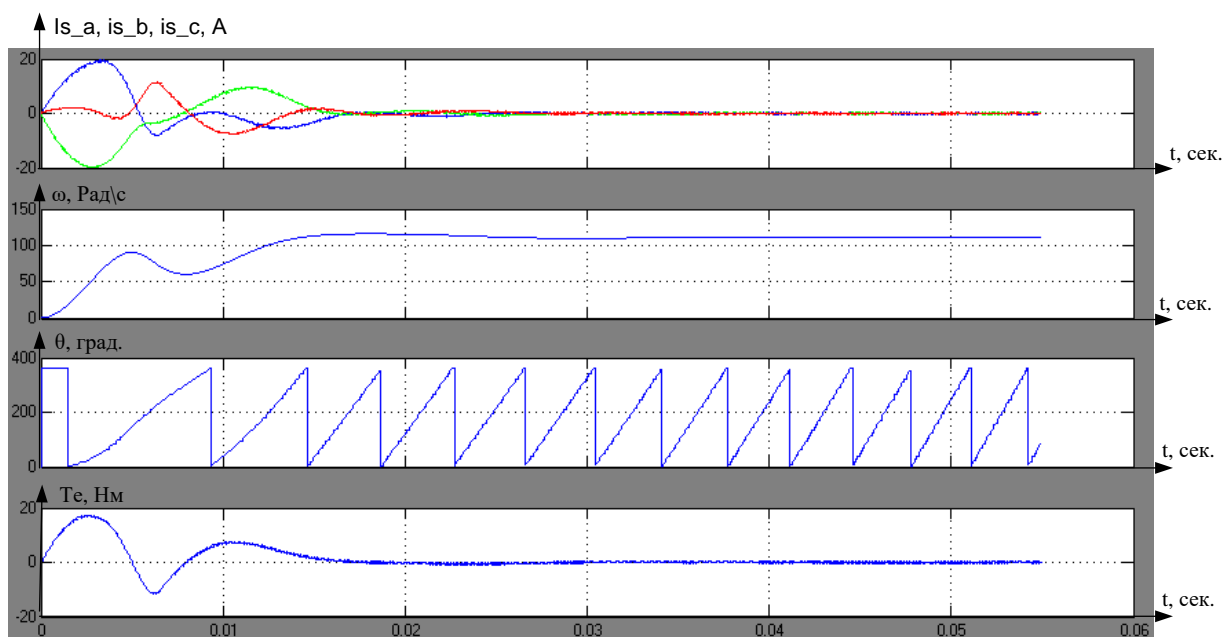


Рисунок 36 – Переходные процессы имитационной модели при расчетах в IQ – математике

Как видно из рисунка 36, переходные процессы немного изменили свой характер, но общая картина осталась целой, это связано с переходом на IQ и потерей точности.

2.2 Исследование влияния частоты расчета контуров

Для еще более приближенной имитации работы реального процессора, попробуем изменить частоты расчет контуров регулирования (в реальности контур тока считается с частотой 10 кГц, а контур скорости в 5-10 раз медленнее)

Назначим частоту расчета контура тока 10 кГц, т.е. в свойствах блоков регуляторов тока в графе «sample time value» выставляем 0.0001, что соответствует частоте расчет 10 кГц. (см. рисунок 38) [18]

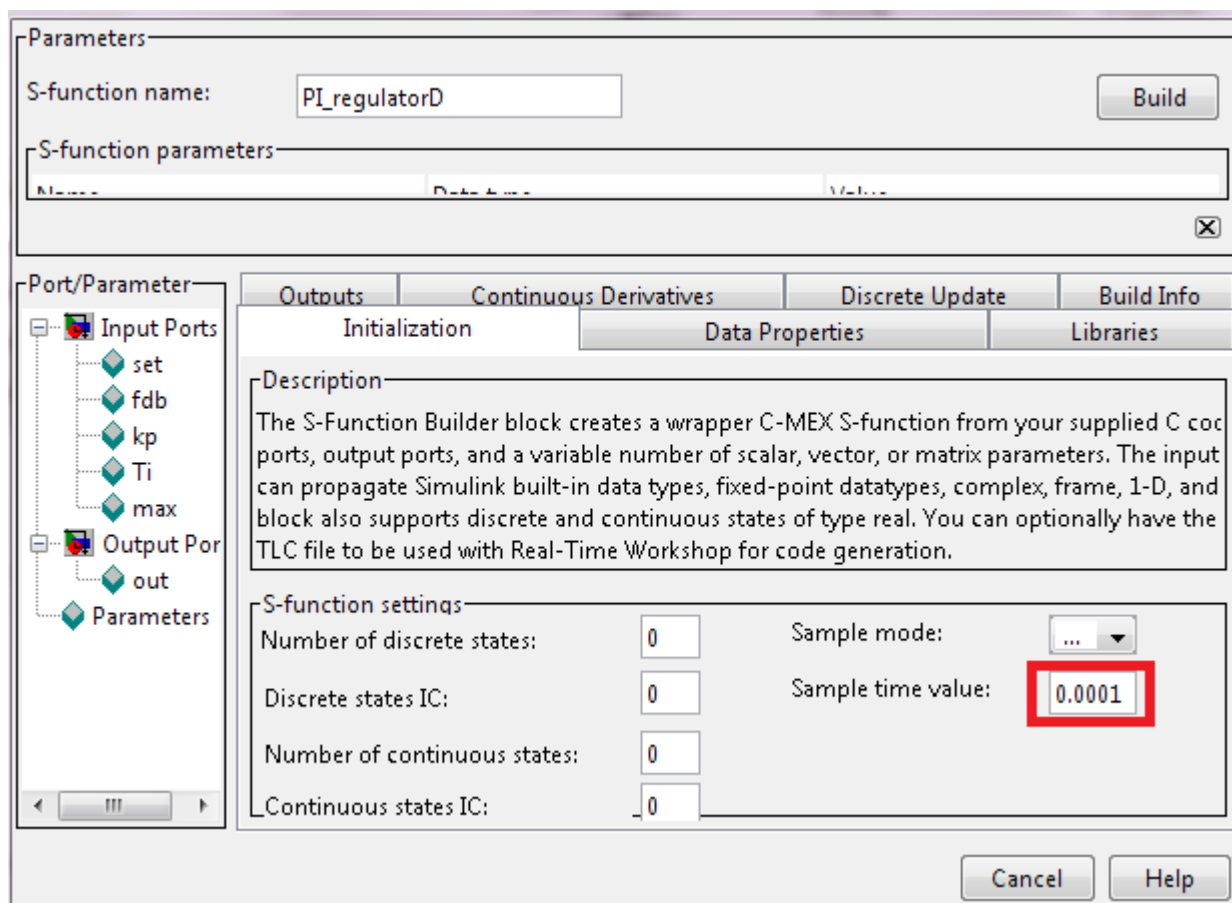


Рисунок 37 – Установка частоты расчета регулятора контура тока на уровень 10 кГц.

Аналогично для регулятора скорости – выставляем 0.001, что означает 1 кГц. (см. рисунок 38)

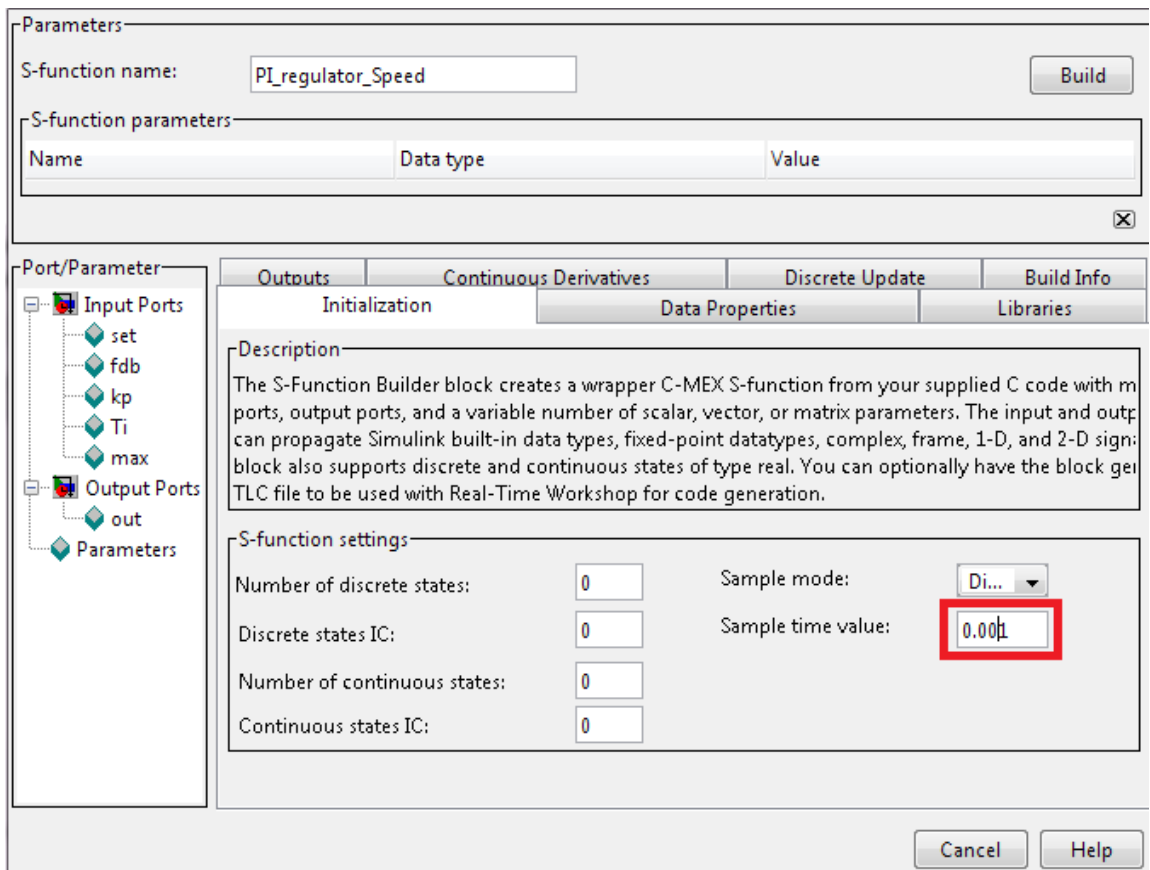


Рисунок 38 – Установка частоты расчета регулятора скорости на уровень 1 кГц

Переходные процессы имитационной модели при имитации расчета на реальных частотах (используемых в микропроцессорных системах управления на основе DSP) показаны на рисунке 39

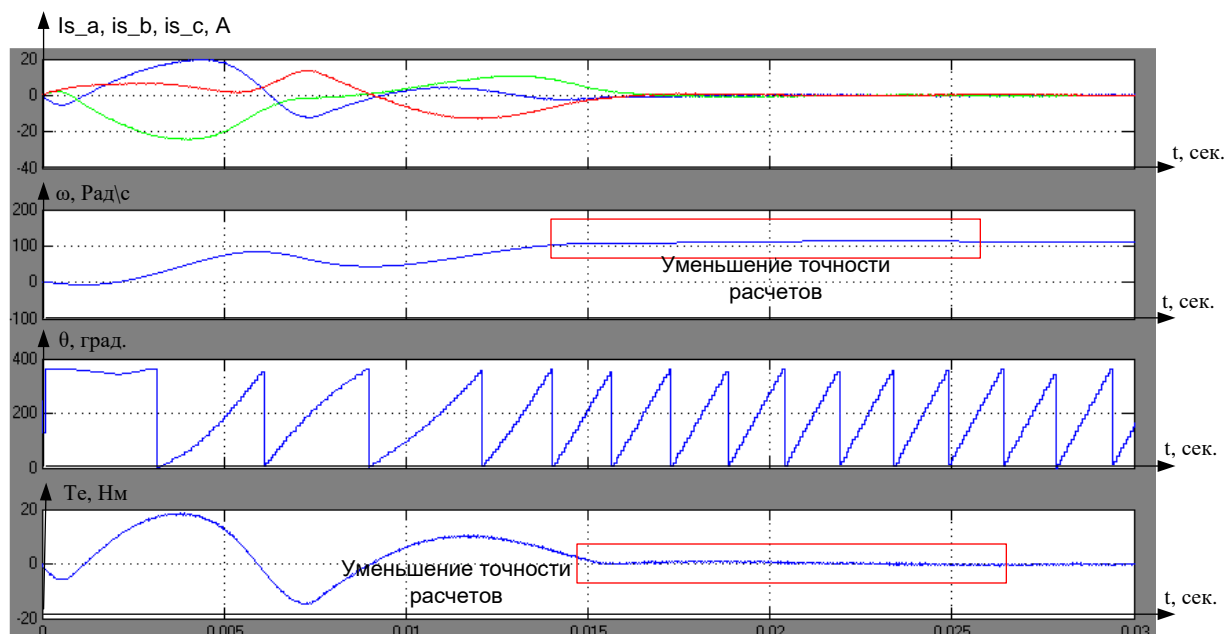


Рисунок 39 – Переходные процессы имитационной модели при расчетах контура тока 10 кГц, контура скорости 1кГц

Из рисунка 39 видно, что скорость не устанавливается на точное значение, а немного колеблется, также отчетливо виден шум сигнала электромагнитного момента двигателя.

2.3 Исследование влияния параметров настройки регуляторов

Для решения проблемы шумов сигналов и неточности отработки задания на скорость будем применять несколько различных методов:

1. Изменение постоянной времени регулятора скорости;
2. Изменение пропорционального коэффициента регулятора скорости;
3. Изменение переменной $Global_Q$ в структуре $IQmath_lib.h$ (влияет на точность расчетов в IQ и, следовательно, на скорость обработки сигналов в реальных системах).[19]

Увеличиваем постоянную времени регулятора скорости (начальное значение – $T_{ис}=0,01$) $T_{ис}=0,02$

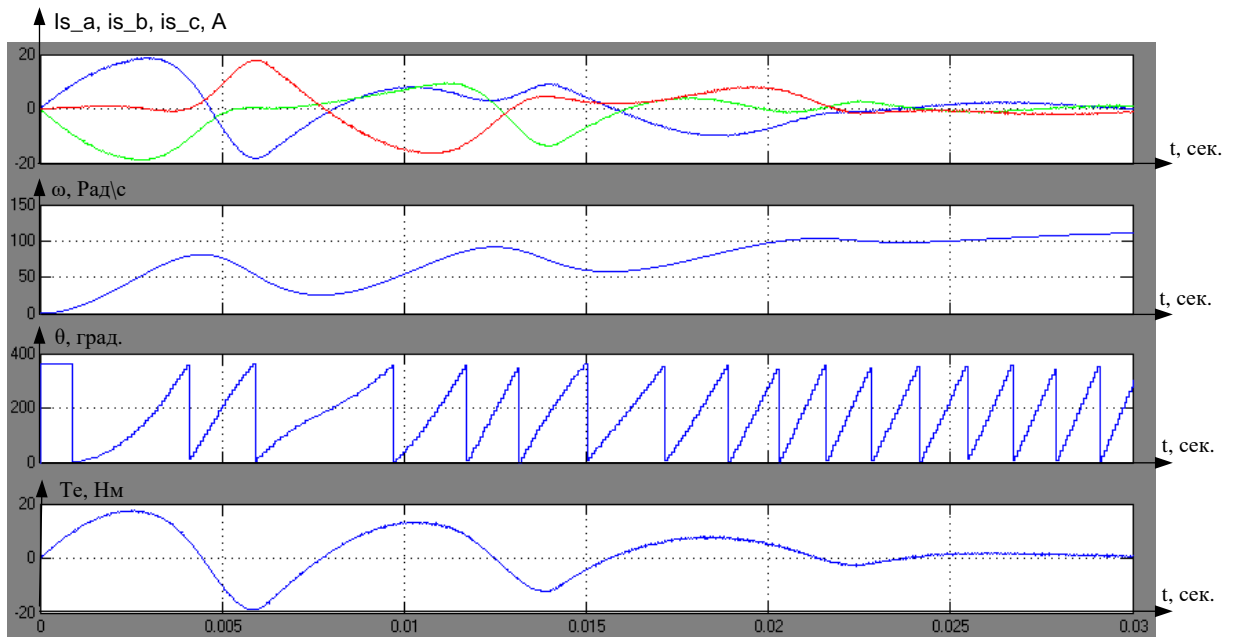


Рисунок 40 – Переходный процесс имитационной модели при $T_{ic}=0,02$

Как видно из рисунка 40, время переходного процесса увеличилось, колебательность возросла, увеличились по амплитуде и затянулись броски тока при пуске. Дальнейшее увеличение постоянной времени приводит к затягиванию переходных процессов и является нецелесообразным.

Уменьшаем постоянную времени контура скорости в 2 раза, $T_{ic}=0,005$. Переходные процессы представлены на рисунке 41.

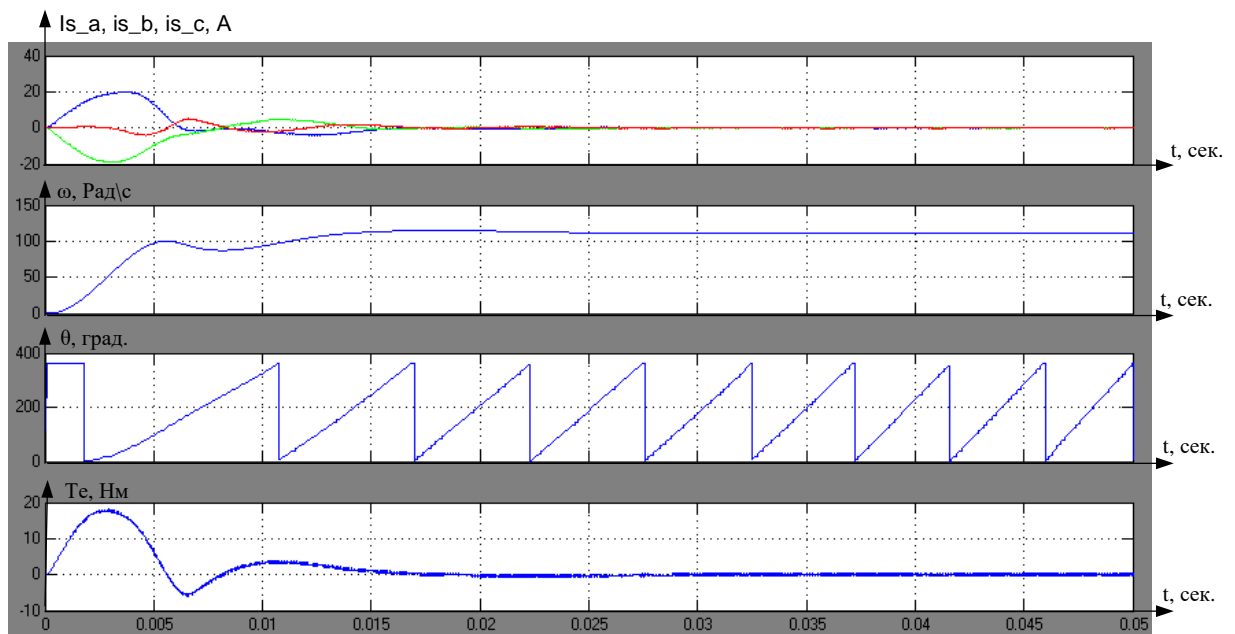


Рисунок 41 – Переходные процессы имитационной модели при $T_{ic}=0.005$

Из рисунка 41 видно, что время переходного процесса уменьшилось, колебательность также уменьшилась, но характер переходного процесса по скорости все еще имеет нежелательную колебательность при пуске.

Уменьшим постоянную времени регулятора тока до $T_{ис}=0,0025$.
Переходные процессы представлены на рисунке 42.

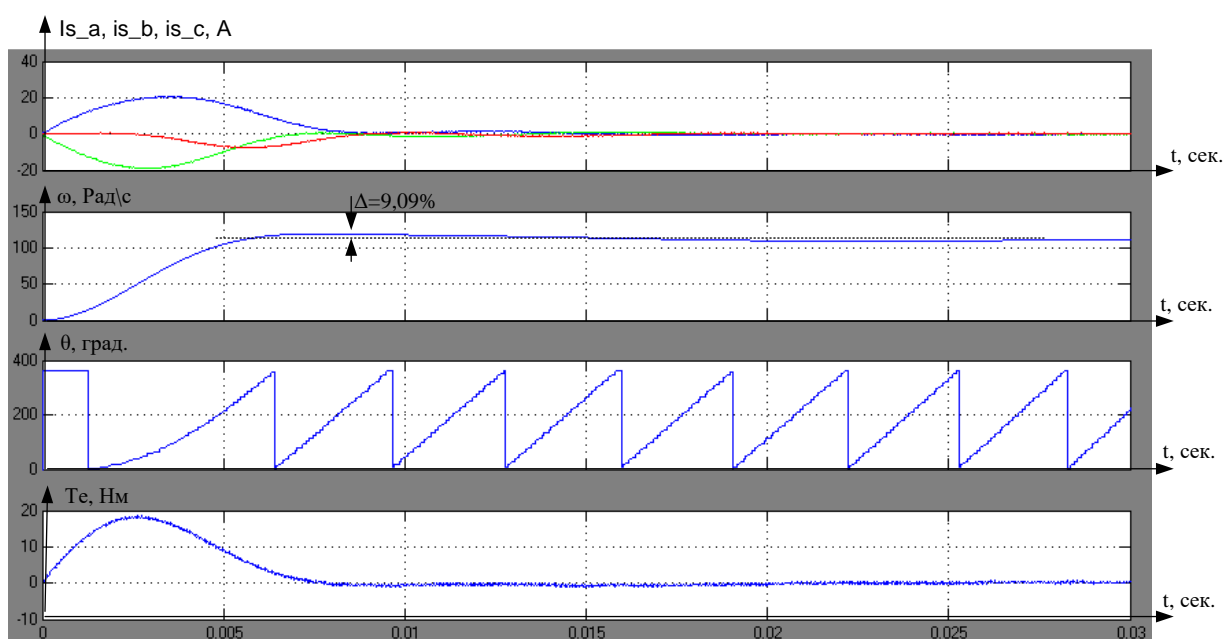


Рисунок 42 – Переходные процессы имитационной модели при $T_{ис}=0,0025$

На рисунке 42 видно, что модель близка к настройке на МО, но перерегулирование превышает уровень 4,32% (стандартная настройка на МО). Данную настройку можно использовать в механизмах, нечувствительных к перерегулированию.

Для уменьшения перерегулирования изменим коэффициент пропорциональности регулятора с $K_{п}=1$ до $K_{п}=0,8$. Переходные процессы представлены на рисунке 43.

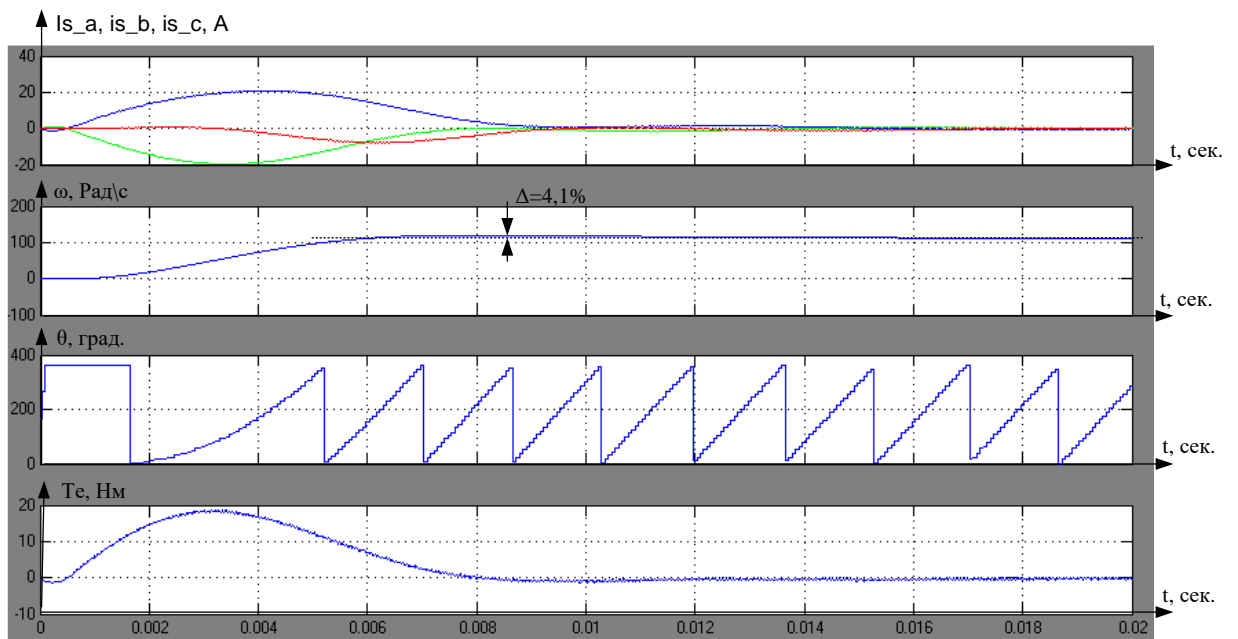


Рисунок 43 - Переходные процессы имитационной модели при $T_{ис}=0,0025$,
 $K_{п}=0,8$

По рисунку 43 можно судить о том, что мы добились желаемого переходного процесса (перерегулирование на уровне 4,1%, минимальное время переходного процесса).

Отообразим графически воздействие постоянной времени и коэффициента пропорциональности регулятора скорости на время переходного процесса и перерегулирование.

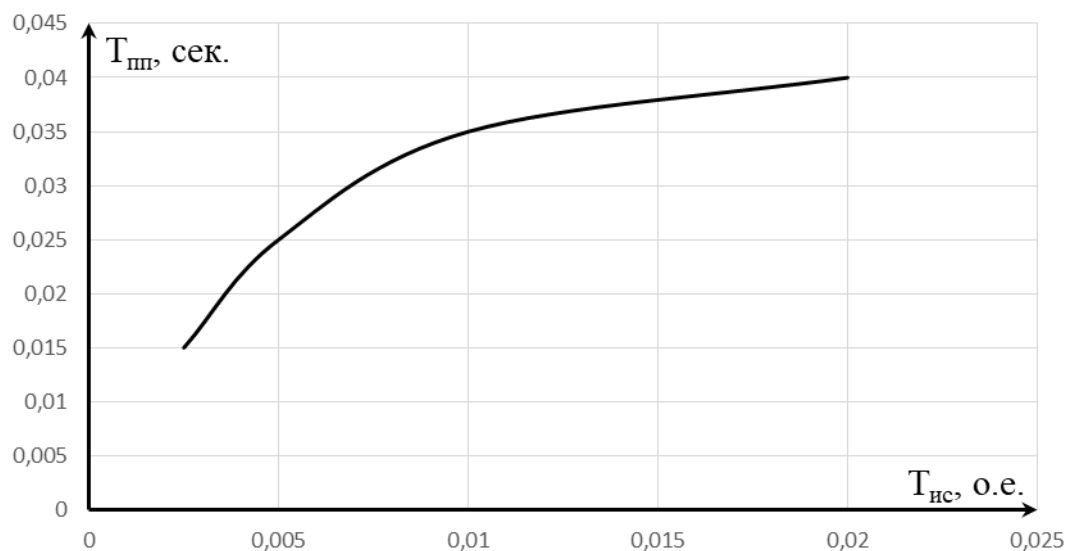


Рисунок 45 – График зависимости времени переходного процесса скорости имитационной модели от постоянной времени регулятора скорости

3. РАБОТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

В качестве объекта исследования имеется имитация привода дверей лифта. Установка состоит из:

- лифтовой балки;
- синхронного двигателя ЯИУШ.525376.002 (рис. 46);
- датчика положения Холла с \sin/\cos выходом;
- контроллера привода двери ЕС-LD-180 НПФМ.421417.002 (рис. 2);
- пульта управления ЕС-LD-180-CU-1.1 НПФМ.421414.002.

Общий вид установки приведен на рисунке 48.



Рисунок 46 – синхронный двигатель ЯИУШ.525376.002

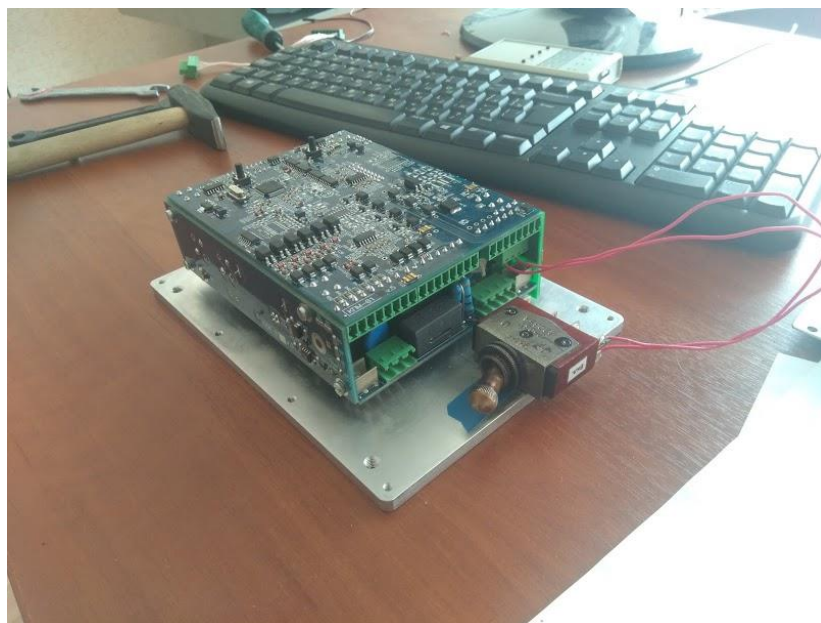


Рисунок 47 – контроллер привода двери ЕС-LD-180 НПФМ.421417.002
(защитный корпус снят, фотобарьер подключен)



Рисунок 48 – привод дверей лифта

3.1 Описание работы двигателя

В качестве двигателя для привода используется собственная разработка АО «КЭМЗ» - синхронный многополюсный двигатель ЯИУШ.525376.002 (рис. 4).

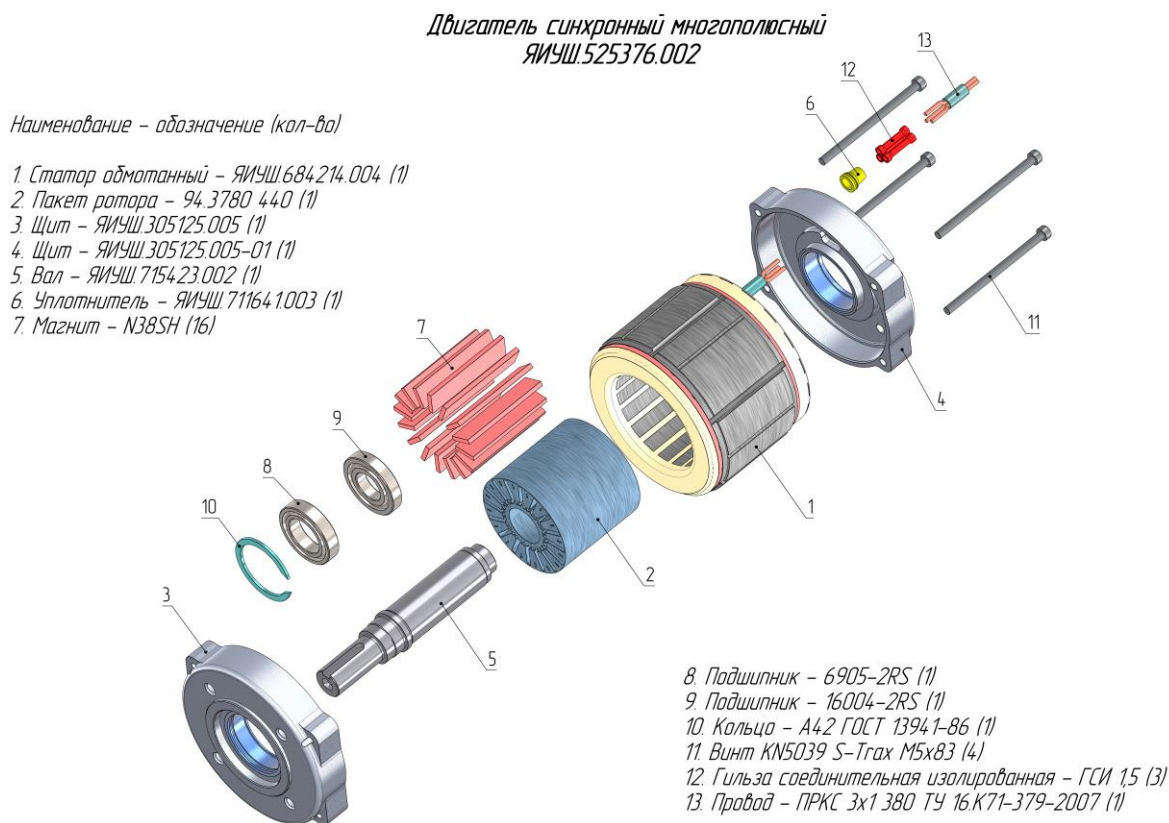


Рисунок 49 – синхронный многополюсный двигатель ЯИУШ.525376.002

Управление двигателем осуществляется через датчик положения, принцип работы которого основан на эффекте Холла. Эффект Холла – возникновение разности потенциалов при помещении проводника в магнитное поле. В данном двигателе это поле создают 16 постоянных магнитов, расположенных радиально. Каждые два соседних магнита расположены одноименными полюсами друг к другу. Датчик непрерывно измеряет положение ротора в пределах двух соседних магнитов и, основываясь на интенсивности полей, определяет положение ротора в данный момент времени. Сигнал датчика имеет вид синусоиды – в зависимости от положения ротора

относительно датчика, интенсивность сигнала будет изменяться по синусоидальному закону, что позволяет определить точное положение ротора в любой момент времени. Для защиты системы от помех и дальнейшего повышения точности датчик выдает четыре сигнала – $\cos+$, $\cos-$, $\sin+$ и $\sin-$. Затем, с помощью операционных усилителей, сигналы складываются и на выходе получается точное положение ротора в данный момент времени. Это позволяет подстроить вектор магнитной индукции таким образом, чтобы момент, производимый двигателем, был максимальным при любой скорости вращения двигателя, что особенно необходимо при проектировании привода дверей лифта.

3.2. Описание контроллера привода двери

Контроллер привода двери EC-LD-180 предназначен для управления приводным синхронным двигателем (мощностью до 0,18 кВт) в механизмах открытия/закрытия лифтовых дверей и выполняет команды лифтовых станций ШУЛК, ШУЛМ, ШУЛР и УЛ, УКЛ, УЭЛ, ШЛР.

Контроллер питается от однофазной сети $220\text{ В}^{+10\%}_{-15\%}$ с частотой питающей сети $50\text{ Гц} \pm 1\%$.

Контроллер выполняет следующие функции:

- определяет текущее положение дверей и наличие препятствий;
- выдаёт сигналы открытого и закрытого состояния дверей, а также наличия препятствия в дверном проёме;
- защиту электродвигателя от перенапряжения, ограничение тока/момента, формирование требуемого закона движения.

Условия эксплуатации

Контроллер устойчив в климатических условиях, соответствующих рабочим:

- рабочий диапазон температур: от минус 10 до плюс 50 °С;

- относительная влажность воздуха до 80%, при атмосферном давлении от 675 до 825 мм рт.ст., без конденсации.

Контроллер состоит из четырех плат с установленными на них компонентами:

- конденсаторный модуль;
- модуль питания;
- модуль управления;
- силовой модуль.

Режимы работы контроллера:

1) Режим инициализации проема – проводится с любого источника питания для подстройки проема под данную балку лифта. Проводить инициализацию можно с любого источника команд:

- с помощью кнопок контроллера;
- с помощью пульта управления;
- со станции управления.

Для успешного проведения инициализации проема, двери лифта должны полностью сомкнуться и разомкнуться до программной регистрации упора. В этом режиме двигатель вращается с пониженной скоростью. После программной регистрации упора контроллер фиксирует положение закрытия или открытия, в зависимости от направления движения, и двигатель прекращает вращение. В точке упора фиксируется начало системы координат проема. Затем необходимо зафиксировать второй упор, после чего двигатель перейдет в режим нормальной работы, а на пульте загорается светодиод, означающий готовность привода к нормальной работе.

2) Режим нормальной работы – в этом режиме подача команд с любого источника дает команду приводу вращаться в указанную сторону согласно кривой, которая была задана при инициализации проема (изображена на рисунке 5). При выполнении закрытия во время прохождения положения, где возможно наличие помех для закрытия, происходит проверка на наличие упора,

по силе большего, чем заданный. В случае регистрации упора, контроллер останавливает движение привода и подает сигнал на открытие. Контроллер будет оставаться в данном режиме до выдачи положения открытия.

3) Режим Аварии.

Если срабатывает авария контроллера, то он отключает подачу напряжения на приводной электродвигатель и резко останавливается.

Если авария не повторяется в течение 6 секунд, контроллер подает на приводной электродвигатель напряжение и переходит в режим инициализации.

Если авария связана с тем, что пропало напряжение питания на входе и дверь закрыта, то происходит сброс замка за счет энергии, накопленной в конденсаторном модуле (данная функция должна быть включена на панели DIP переключателей).

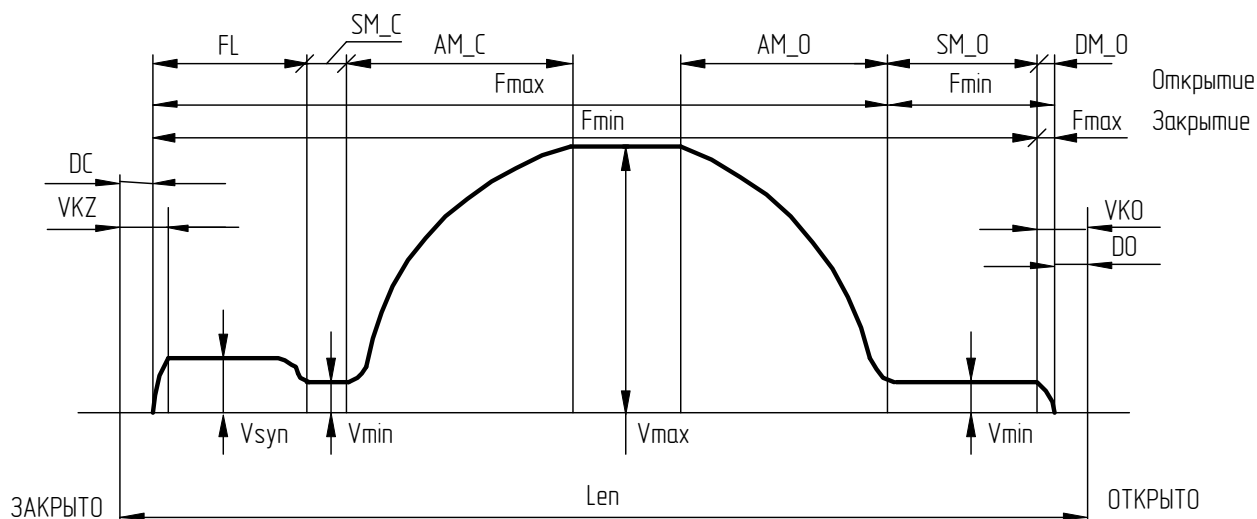


Рисунок 50 – кривая движения

Отработка кривой движения представлена на рисунке 51.

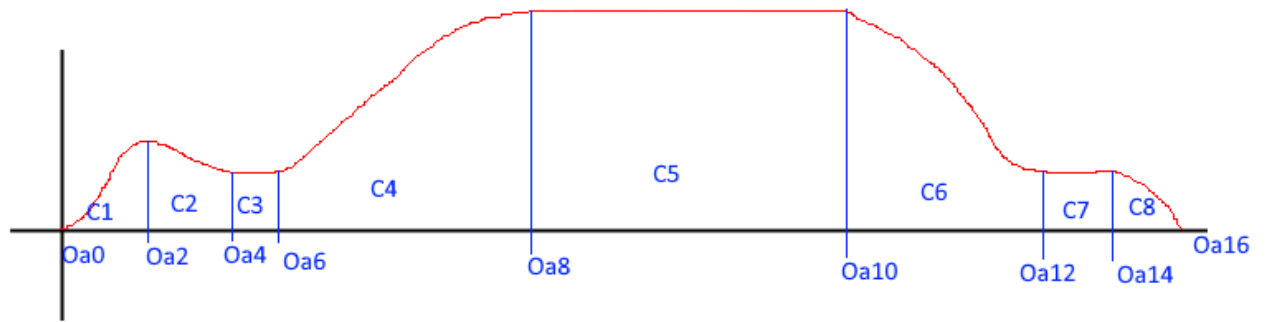


Рисунок 51 – Отработка заданной кривой движения

Из данных, представленных на рисунке 51 можно сделать вывод, что электропривод обрабатывает заданную кривую движения. Помимо плавной отработки заданной кривой привод позволяет регулировать значения уставок и параметров электропривода.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

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

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;

- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование, а также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;
- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Карта сегментирования рынка разработок для ЭП

	Электропр ивод по системе ТРН-АД	Электропр ивод по системе ПЧ-СД	Электропр ивод по системе ПЧ-АД
Проектиро вание и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслужив ание и ремонт			
Фирма А		Фирма Б	

Результаты сегментирования:

- Основными сегментами рынка являются все виды деятельности для асинхронных электроприводов с ПЧ-АД, ПЧ-СД и ТРН-АД;
- Наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов с преобразователем частоты (ПЧ)
- Наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой асинхронных электроприводов с ПЧ.

Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;

- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 13).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	92	100	0,92	6,44
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,12	85	100	0,85	10,2
3. Помехоустойчивость	0,03	94	100	0,94	2,82

Окончание таблицы 2

4. Энергоэкономичность	0,11	90	100	0,9	9,9
5. Надежность	0,06	94	100	0,94	5,64
6. Уровень шума	0,03	75	100	0,75	2,25
7. Безопасность	0,07	84	100	0,84	5,88
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	80	100	0,8	3,2
9. Простота эксплуатации	0,04	95	100	0,95	3,8
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0	100	100	1	0
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Цена	0,11	65	100	0,65	7,15
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	95	100	0,95	6,65
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,02	78	100	0,78	1,56
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				84,72

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 92 + 0,12 \cdot 85 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 84,72,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 84,72, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

SWOT-анализ

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

Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

1. **Сильные стороны.** Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. **Слабые стороны.** Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где

он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

3. **Возможности.** Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке? Проводите поиск свободных ниш, но помните, что свободными они остаются недолго. Благоприятная возможность, увиденная сегодня, может перестать существовать уже через три месяца. Благоприятные возможности могут возникать в силу действия следующих факторов:

- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. **Угроза** представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, изменения в законодательстве, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представляем в табличной форме (таблица 3).

Таблица 3. Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и 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 по сравнению с другими. С8. Высокое качество продукции.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца Сл2. Большой срок выхода на рынок Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения

<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>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>		

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз должно происходить на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Полученная интерактивная матрица проекта представлена в таблице 15.

Таблица 4 - Интерактивная матрица проекта

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

Результаты анализа таблицы:

B1B2C2C4C7C8

B2C1C3C6

B3C1C3C4

B4C6C7C8

B5C1C4C5C6C7C8

Продолжение таблицы 4

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	-	0
	B5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

B5Сл1Сл3

Сильные стороны проекта										
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	У1	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	У2	0	0	-	-	-	-	-	-	+
	У3	+	0	+	+	-	+	0	0	0
	У4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	У5	0	-	-	-	+	-	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1С5
У3С1С3С4С6
У2С9
У5С5

Окончание таблицы 4

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

Результаты анализа таблицы:

У1Сл1
У2Сл3
У3Сл1Сл2Сл3
У4У5Сл1Сл3

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 5).

Таблица 5. Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4.Повышение производительности труда.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p> <p>...</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл2. Большой срок выхода на рынок</p> <p>Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В5. Развитие технологий в данной отрасли</p>	<p>В1В2С2С4С7С8</p> <p>В2С1С3С6</p> <p>В3С1С3С4</p> <p>В4С6С7С8</p> <p>В5С1С4С5С6С7С8</p>	<p>В5Сл1Сл3</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p> <p>У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У5. Появление новых конкурентных разработок.</p>	<p>У1С5</p> <p>У3С1С3С4С6</p> <p>У2С9</p> <p>У5С5</p>	<p>У1Сл1</p> <p>У2Сл3</p> <p>У3Сл1Сл2Сл3</p> <p>У4У5Сл1Сл3</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры,

техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в таблице 18.

Таблица 6 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта	Инженер
	4	Календарное планирование работ	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер
	6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер
	7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	8	Расчет регулировочных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	Инженер
	9	Разработка математической модели системы электропривода	Инженер
	10	Оптимизация системы регулирования электропривода	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

4.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сводим в таблицу 7.

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел} - \text{ дней};$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 116 - 14} = 1,553;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,553 = 3,106 \approx 4 \text{ дня}.$$

Таблица 7 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП		4		9		6		6		10
Расчет параметров двигателя и модели		4		6		5		5		8
Выбор способа регулирования скорости		2		4		8		8		12
Расчет регулировочных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»		2		4		3		3		5
Разработка математической модели системы ЭП	3		6		5		5		8	
Оптимизация системы регулирования электропривода		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки		1		3		2		2		4

На основе таблицы 7 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 8 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ ра бот	Вид работ	Исполни тели	T _{кi} кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11														
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7														
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10														
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8														
7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер	12														
8	Расчет предельных характ. системы «преобр.– электродвиг.»	Инженер	5														
9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Руководитель	3														
10	Оптимизация САР электропривода	Инженер	10														

Окончание таблицы 8

11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер	11																
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2																
13	Технико-экономические расчеты	Инженер	8																
14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8																
15	Составление пояснительной записки	Инженер	4																
	Общее время на проект		111																
	Время работы инженера		95																
	Время работы руководителя		16																

4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 21.

Таблица 9 - Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	2351	9404
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	1523	16753
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7	1523	10661
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	2351	16457
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10	1523	15230
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8	1523	12184
7	Выбор способа регулирования	Инженер	12	1523	18276

8	Расчет предельных характ. системы «преобр.– электродвиг.»	Инженер	5	1523	7615
9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Руководитель	3	2351	7053
10	Оптимизация САР электропривода	Инженер	10	1523	15230
11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер	11	1523	16753
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	2351	4702
13	Технико-экономические расчеты	Инженер	8	1523	12184
14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8	1523	12184
15	Составление пояснительной записки	Инженер	4	1523	6092
Итого:					180778

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 8);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{53594 \cdot 10,4}{237} = 2351 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение 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 10).

Таблица 10 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

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

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

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{тс}$);

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

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{с1} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_T и

учитывается по единой для бюджетных организаций тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 10.

Таблица 11 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _{тс} , руб.	k _{пр}	k _д	k _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель						300	24	7200
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	95	144685
Итого З _{осн}								189501

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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 (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,271 \cdot 7200 = 1951 \text{ руб}$$

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

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представляем в табличной форме (таблица 11).

Таблица 12 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	7200	
Студент-дипломник	144685	17362
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого		
Руководитель	1951	
Инженер	43914	

Накладные расходы

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

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ = (180778 + 21693 + 45865) = 39734$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) 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 13.

Таблица 13 - Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	180778
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	21693
3. Отчисления во внебюджетные фонды	46099
4. Накладные расходы	39734
5. Бюджет затрат НИИ	288304

Определение ресурсоэффективности проекта

Финансовую эффективность проекта можно оценить при помощи интегрального финансового показателя:

$$I_{фин}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где:

$I_{фин}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского

проекта.

Расчёт интегрального финансового показателя проводим в виде табличной формы.

Таблица 14 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

Вариант схемы	Φ_{max} , руб.	Φ_{pi} , руб.	$I_{фин}^{исп.i}$, о.е.
1	461500	338200	0,73
2		384600	0,83
3		461500	1

Величина интегрального финансового показателя разработки схемы 3 (асинхронный электропривод с преобразователем частоты) отражает соответствующее численное увеличение стоимости электропривода при

одинаковой мощности. Схема 2 имеет средний интегральный показатель среди трёх конкурентных технических решений, и, следовательно, вариант схемы стоит на втором месте по финансовой эффективности.

Определение ресурсоэффективности проекта схемы 2 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы.

Таблица 15 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Электропривод по системе ТРН-АД	Асинхронный электропривод по системе ПЧ-СД	Асинхронный электропривод по системе ПЧ-АД
1. Безопасность	0,25	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,10	5	5	5
3. Помехоустойчивость	0,10	4	4	4
4. Энергосбережение	0,15	4	4	5
5. Надёжность	0,25	5	5	4
6. Материалоёмкость	0,15	4	4	5
Итого:	1,00	4,5	4,5	4,6

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,5.$$

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

Выводы по главе

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения в сравнении с другими перспективами, был произведен SWOT-анализ, планирование, которое

ограничило выполнение работы в 111 дней. Также был посчитан бюджет НИИ равный 301329 руб., основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность - сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач, норм и ценностей, понимание последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

В данном разделе рассматриваются безопасность и экологичность лаборатории где исследуется и проверяется синхронный электропривод дверей кабины лифта. Здесь будет рассмотрено необходимое обеспечение условий труда в лаборатории (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы экологической безопасности.

Безопасность включает в себя влияние опасных и вредных факторов, их анализ и меры их профилактики.

5.1 Производственная безопасность

Описание технологического процесса и рабочего места

Технологический процесс исследования синхронного электропривода дверей кабины лифта заключается в следующем:

1. Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике;
2. Исследование работы системы электропривода в лаборатории;
3. Выбор необходимого оборудования;
4. Создание модели электропривода и анализ её работы;
5. Лабораторное апробирование системы ПЧ-СД;
6. Анализ полученных результатов

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- монитор;
- компьютер;
- источник напряжения, необходимый для работы оборудования;
- исследуемый синхронный двигатель и преобразователь частоты;

5.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки электропривода питателя сушильного барабана.

Лаборатория в которой проводится исследование электрического привода, по опасности поражения электрическим током относится к помещениям без повышенной опасности. Поскольку в данном помещении отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность, такие как: сырость; токопроводящая пыль; высокая температура; возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, имеющим соединение с землей, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования (открытым проводящим частям), с другой; химически активная или органическая среда. [31]

Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании [32].

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что

может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Основную опасность представляют выходные концы валов, а также приводной ремень. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Часть технологического процесса исследования и проверки электропривода дверей кабины лифта основана на работе с двигателем, который в свою очередь является источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [24]. Чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры по оптимизации конструкции двигателя, такие как: замена подшипников качения на подшипники скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Но такие меры слишком затратные и трудоемкие. Также имеются и другие способы решения данной проблемы. Можно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов и отдельных частей установки для снижения уровня шума. Для работы электроустановки по назначению также является обязательным закрытие звукоизолирующими кожухами всей установки, но это может вызвать затруднения при работе с оборудованием и его обслуживании.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света [18], при работе в условиях недостаточной освещённости, связанным с временем суток и погодными условиями.

Однако недостаток освещенности рабочей зоны и помещения в целом плохо сказывается на здоровье работника [18,25]. Для улучшения ситуации необходимо установить светильники на основании следующего расчета:

Данные, необходимые для расчета искусственного освещения:

- длина помещения $A_{\text{пом}} = 10 \text{ м};$
- ширина $B_{\text{пом}} = 8 \text{ м};$

- высота $H_{\text{пом}} = 3 \text{ м};$
- коэффициент отражения стен $R_c = 35\%;$
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,8 \text{ м};$
- коэффициент отражения потолка $R_n = 40\%;$
- коэффициент запаса $k = 1,5;$
- коэффициент неравномерности $Z = 1,1.$

Требуется создать освещенность $E = 300 \text{ Лк};$

Рассчитаем систему общего освещения (люминесцентного).

Выбором являются светильники типа ОД с интегральным критерием оптимальности расположения светильников $\lambda = 1,4.$

Расстояние светильников от перекрытия принимаем $h_c = 0,2 \text{ м}$ и получаем:

$$h = H_{\text{пом}} - h_c - h_p = 3 - 0,2 - 0,8 = 2 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2 = 2,8 \text{ м};$$

Определяем число рядов светильников:

$$n = \frac{B}{L} = \frac{8}{2,8} = 2,85 \approx 3;$$

Расстояние от крайнего светильника до стены:

$$\frac{L}{3} = \frac{2,8}{3} = 0,933 \text{ м};$$

Светильники размещаем в три ряда. В каждом из рядов будет установлено 7 светильников типа ОД. Мощность светильника 30 Вт, длина 0,9 м. Разрывы между светильниками составят 26 см. План размещения светильников представлен на рисунке 1. В каждом светильнике установлено по две лампы, соответственно общее число ламп в помещении $n = 42.$

Найдем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 10}{2 \cdot (8 + 10)} = 2,22$$

Тогда, коэффициент использования светового потока равен:

$$\eta = \frac{q_n + q_c + q_3}{3} = \frac{70 + 35 + 40}{3} = 48,3\%$$

Рассчитаем световой поток:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 80 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{42 \cdot 0,483} = 1952,08 \text{ Лм}$$

Определим потребный световой поток ламп в ряду. Для этого выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛДД 40 Вт со световым потоком 2100 Лм.

Делаем проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{2100 - 1952,08}{2100} \cdot 100 \leq 20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq 0,07\% \leq +20\% \text{ – условие выполнено.}$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 42 \cdot 30 = 1260 \text{ Вт}$$

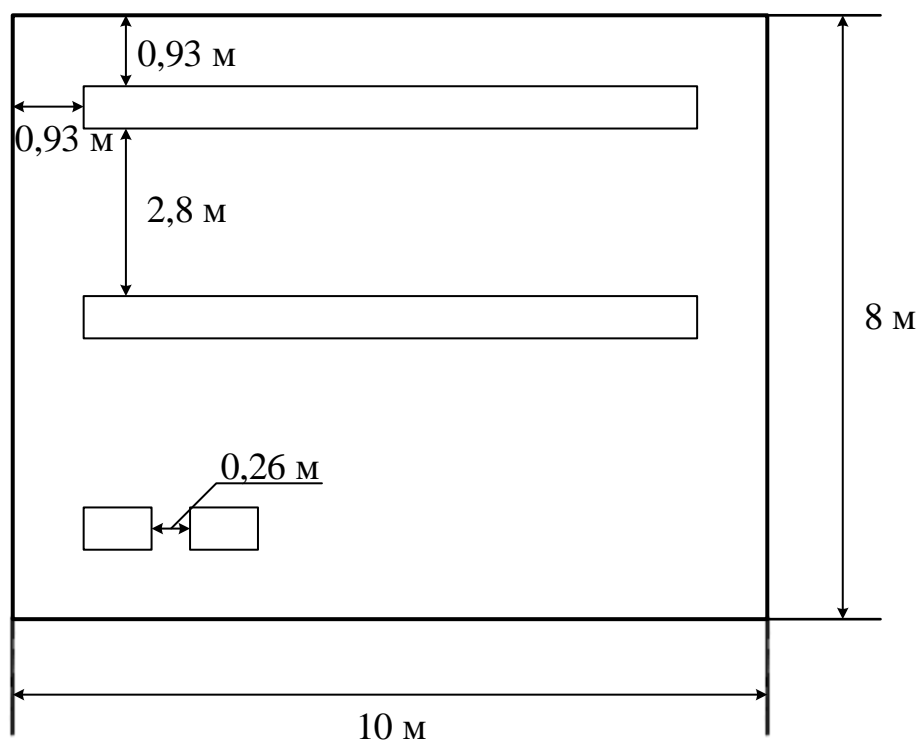


Рисунок 52 – План размещения светильников с люминесцентными лампами

Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещенностью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки [18].

Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видимые цвета.

Другим вредным фактором является пониженная подвижность воздуха [26], связанная с плохой вентилируемостью лаборатории, в связи с отсутствием вентиляционной системы.

Следствием предыдущего вредного фактора и наличием теплоотдающих при работе элементов установки будет повышенная температура воздуха рабочей зоны [26], которая пагубно влияет на состояние человека.

Для решения проблем низкой подвижности воздуха и повышенной температуры рабочей зоны необходимо установить вентиляционную систему.

Вентиляция позволяет осуществлять регулируемый воздухообмен, обеспечивающий нормальные санитарно-гигиенические условия в помещениях.

Также вредным фактором является повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо провести мероприятия на основании [23], а именно, жесткая фиксация рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов.

5.4 Экологическая безопасность

Технологический процесс исследования и проверки системы ПЧ – СД, а также её использование не представляет угрозы для окружающей среды. Это связано с тем, что процесс является безотходным, и в течении работы нет выделения опасных для экологического состояния элементов. Показатели выделяемого тепла, электромагнитных излучений также не выше допустимых значений. Данная система может применяться на любых предприятиях, которые нуждаются в ней.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [30]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются

ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки.

При разработке системы приточной вентиляции используется ПЭВМ. В ПЭВМ содержится множество компонентов, которые содержат токсичные вещества. Например:

1. Свинец (накапливается в организме, может поражать нервную систему и почки);
2. Никель и цинк (могут вызывать дерматит);
3. Щелочи (опасность для кожных покровов и слизистых);

Поэтому ПЭВМ требует особых способов утилизации:

1. Отделение неметаллических и металлических частей;
2. Неметаллические части должны быть подвержены специальной переработке
3. Металлические части должны быть переплавлены и использованы для последующего производства

Данные мероприятия позволяют обеспечить максимально эффективную утилизацию отходов и максимально уменьшить их неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятным чрезвычайными ситуациями при исследовании и проверке электропривода дверей лифта являются пожар или взрыв на рабочем месте [26,27,28]. Потенциальное возникновение пожара связано с возможным накоплением токоведущей пыли внутри компьютера, что может привести к короткому замыканию, возгоранию пыли и, если не будет принято никаких мер, распространению пожара. К воспламенению материалов может привести также наличие нагреваемых элементов в ходе работы установки. Достаточно

следить за тем, чтобы вблизи установки во время её работы не находились легко воспламеняемые материалы и вещества.

Лаборатория по разработке и исследованию электропривода, согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» и Техническому регламенту о пожарной безопасности относится к категории «Д». Категория Д – это категория помещений в которых присутствуют негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

Согласно Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме" [29], тушение пожара организуется первичными средствами, такими как: огнетушитель порошковый (ОП-5, 4 штуки), огнетушитель углекислый (ОУ-5, 4 штуки, вместительность баллона составляет 7,2 л.). В случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

В связи с возможной угрозой возникновения пожара был разработан план действий:

- в случае обнаружения возгорания необходимо сообщить руководителю и попытаться потушить очаг возгорания своими силами с помощью средств первичного пожаротушения такими как: огнетушитель (порошковый, углекислотный);

- в случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель;

- немедленно сообщить о чрезвычайной ситуации в пожарную охрану по телефону 01 (сотовый 010), назвать адрес объекта, место и причины возникновения пожара;

- принять меры по эвакуации людей, материальных ценностей;

- приступить к тушению пожара, отключив электроэнергию;

- встретить подразделения пожарной охраны и, при необходимости, оказать помощь при выборе наилучшего пути для подхода к очагу пожара.

Возникновение других видов ЧС маловероятно, соответственно рассмотрению не подлежат.

5.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы была разработана и исследована имитационная модель микропроцессорной системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Имитационная модель содержит:

- Модель двигателя;
- Модель трехфазного IGBT-моста инвертора;
- Модель ШИМ-модулятора;
- Модель прямого и обратного преобразования Кларка;
- Модель прямого и обратного преобразования Парка-Горева;
- Модель датчика положения (резольвер);
- Модель обработчика сигнала с резольвера;
- Модель ПИ-регуляторов тока по осям D и Q;
- Модель ПИ-регулятора скорости;

В работе представлена разработка идеальной имитационной модели (частоты расчета контуров 1 МГц, расчеты с плавающей запятой) создание такой модели в реальности приведет к очень большим экономическим затратам, поэтому далее был представлен переход от идеальных условий к реальным (преобразование кода в расчет с фиксированной запятой, уменьшение частоты расчета контуров до реальных), что позволило более реально оценить влияние параметров настройки регуляторов на качество переходных процессов и позволило решить такие насущные проблемы реальных систем как:

1. Ухудшение качества переходных процессов вследствие шумов сигналов и электромагнитных помех.
2. Колебательность системы при настройке «по умолчанию».
3. Уменьшение и нахождение оптимального времени переходного процесса без потери качества самого переходного процесса.

В процессе исследования было показано, что для решения вышеперечисленных проблем необязательно использовать дорогостоящие DSP

– процессоры, предназначенные для расчетов в режиме «с плавающей запятой», достаточно варьировать коэффициенты регуляторов для достижения желаемого переходного процесса. Также в процессе исследования было выяснено что изменение постоянной времени регулятора контура в более значительной степени влияет на качество и характер переходных процессов, чем изменение коэффициента пропорциональности.

Данные исследования планируется применять в учебном процессе и для дальнейших исследований с более мощными и скоростными двигателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» - Иваново 2008 – 298 с.
2. Чернышев, Александр Юрьевич. Электрический привод : учебно-методическое пособие / А. Ю. Чернышев, С. И. Качин, И. А. Чернышев; Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 156 с.: ил.. — Библиогр.: с. 141.
3. Дементьев, Юрий Николаевич. Электрический привод : учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — 224 с.: ил.. — Библиогр.: с. 219-220.. — ISBN 978-5-98298-612-2
4. А.С. Каракулов, Д.С.Аксенов, Б.В.Арещенко, В.С. Саидов Разработка программного обеспечения для систем управления электрическими двигателями: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2007. – 261 с.
5. Герман – Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие СПб.: КРОНА принт, 2001- 320с., ил.
6. Овчинников, Игорь Евгеньевич. Бесконтактные двигатели постоянного тока / И. Е. Овчинников, Н. И. Лебедев. — Л. : Наука, 1979. – 270 с.
7. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами, 2001.– с. 155–159.

8. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) : курс лекций : учебное пособие / И. Е. Овчинников. — СПб. : Корона-Век, 2006. — 333 с. : ил. — Библиогр.: с. 333.
9. Куо, Бенджамен С. Теория и проектирование цифровых систем управления : пер. с англ. / Б. С. Куо. — М. : Машиностроение, 1986. — 447 с.
10. Повленко А.М., Бутусов П.Н. MatLab для студента.- СПб.: БХВ-Петербург.2005-320 с.:ил.
11. Дейтел Х. Как программировать на С+ : пер. с англ. / Х. Дейтел, П. Дейтел. — М. : Бином, 1999. — 1024 с. : ил.
12. Образовательный математический сайт. [Электронный ресурс]. – <http://www.exponenta.ru>.
13. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: Техника, 1990. – 280 с.
14. Анучин А.С. Козаченко В.Ф. Архитектура и программирование DSP-микроконтроллеров TMS320X24XX для управления двигателями в среде Code Composer: Лабораторный практикум. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 96 с.
15. Удут Л.С., Мальцева О. П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1.- введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2.-оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. Томск, изд. ТПИ, 2000. – 144 с.
16. Парр Э. Программируемые контроллеры: Руководство для инженера/Э. Парр: пер. 3-го англ. изд.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.: ил.
17. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
18. Каракулов А.С. Разработка алгоритмов управления для микропроцессорных электроприводов. Лабораторный практикум: учебное

пособие / А.С.Каракулов. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 104 с.

19. Годбоул Кедар. Переход от аналогового управления электроприводом к цифровому //Электронные компоненты.–2006.–№11.–с. 25-33

20. ГОСТ 12.0.003 – 2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

21. ГОСТ Р 12.1.019 – 2009. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

22. ГОСТ 12.0.004 – 2015 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда

23. ГОСТ 12.1.030 – 81 ССБТ. Защитное заземление, зануление

24. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

25. ГОСТ 12.1.012 – 2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования

26. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)

27. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий

28. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003

29. ГОСТ 12.1.004 – 91 система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменениями N 1)

30. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования

31. Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме"

32. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 “Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств”

33. Правила устройства электроустановок (7 изд.)

34. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»

Приложение А

SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF ELEVATOR CABIN DOORS

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМБЛ	Сидорков Михаил Юрьевич		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

Introduction:

AC electric drive is a complex electro mechanic system that provides speed control in a given range with desired accuracy. It is a system of several interconnected channels – energy, electric, electromechanic and information channels. Energy channel consists of electric grid sector.

The permanent magnet synchronous motor (PMSM) is the most perspective motor in low and medium power applications.

1.2.1 PWM mathematical description.

Pulse-width modulation is an approximation of multilayer signal or continuous desired signal to reference binary signals that have two states (ON and OFF) so that during some time period their values are equal. In symbolic form it can be described as following:

$$\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt = \sum A \cdot \Delta T_i \quad (1)$$

Where $x(t)$ is a desired input signal in a range from t_1 to t_2 and ΔT_i is a length of PWM impulse with an amplitude A . ΔT_i is being adjusted so sum of the values are as equal as possible during a long time period, as well as average periodic values.

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt}{t_2 - t_1} = \frac{\sum A \cdot \Delta T_i}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

As usual, the controlled states mentioned above are power settings of an electronic device, e.g. DC voltage switching regulators or electric motor speed.

Pulse-width converter is a device that generates PWM signal using given value of control voltage. Its main advantage is high efficiency of its power boosters which is achieved by using them only in switching mode. Such use of boosters lowers energy dissipation of power converters.

PWM uses periodical series of rectangular pulses as basis signal and length of these pulses as an information parameter that is bound with discrete modulating

signal. Periodical series of rectangular pulses has constant component which is in direct proportion to their length. If these pulses flow through low pass filter with cutoff frequency lower than pulses frequency this constant component can be easily extracted, obtaining DC voltage. In case of different pulse width, low pass filter will obtain slowly changing voltage that follows to pulse width changing pattern. As a result, digital-to-analog converter (DAC) can be built using PWM: signal values coded via pulse width and low pass filter converts pulse series into slowly changing signal.

Pulse-width modulator uses transistors or different switches in switching mode, so that it is either ON or OFF. In case of ON switch, it has an infinite impedance, so there is no current in circuit. Though all voltage drops on this switch, in absolute numbers, dissipated power equals to zero. In case of OFF switch, its impedance is neglectable, so voltage drop and power dissipation is extremely low.

$$1. R_r \rightarrow \infty \leftrightarrow P = \frac{U^2}{R} \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$2. R_r \rightarrow 0 \leftrightarrow P = I^2 \cdot R \rightarrow 0 \quad (4)$$

PWM is a pulse signal with constant frequency and changing width of pulses. By changing this width it is possible to change average voltage on PWM.

Analog comparator generates PWM. Saw-tooth basis signal is supplied to its negative input and modulating discrete analog signal – to its positive input. Pulse frequency is a frequency of saw-tooth signal peaks. That duration when input signal is greater than basis corresponds to output logical high, and when it's lower than basis corresponds to logical low.

In digital equipment, which outputs can be either high or low, it is common to approximate desired average output using PWM. Procedure is simple: N-bit counter generates saw-tooth signal. Digital PWCs operate on constant frequency that usually is much greater than controlled devices reaction time. Between setting pulses peaks, DPWC output remains stable. Depending on comparator output, which compares counter value with approximated digital signal, there is either logical high or low on DPWC output. During a number of cycles, output can be seen as pulse series with

logical high and low levels, which alternate every cycle. Frequency of these series is proportional to approximated signal levels. Low frequency means that there are long periods of signals with the same level. [1]

1.2.2 Block diagram of electric drive power channel

Electric drive power channel consists of:

- frequency converter, that serves as electric converter;
- electric motor, that serves as electromechanical converter;
- mechanical system that serves as mechanical converter.

Electric motor models on the basis of generic electrical machine that were made in two-phase d-q system are usually used while solving tasks of controlled electric drives analysis and synthesis. In Figure 5 there is a block diagram of continuous linearized system of power channel. The system called “Converter – permanent magnets synchronous motor in rotating coordinates, oriented on resulting rotor flux linkage vector”. Converter control voltages U_d and U_q used as inputs and motor rotary speed ω is an output. Given diagram is described with following midpoint coordinates: $U_{1d}, U_{1q}, I_{1d}, I_{1q}, \Psi_{1d}, \Psi_{1q}$ are voltage, stator current and rotor flux linkage components in two-phase d, q system and M_{em} is electromagnetic torque, Nm. [2]

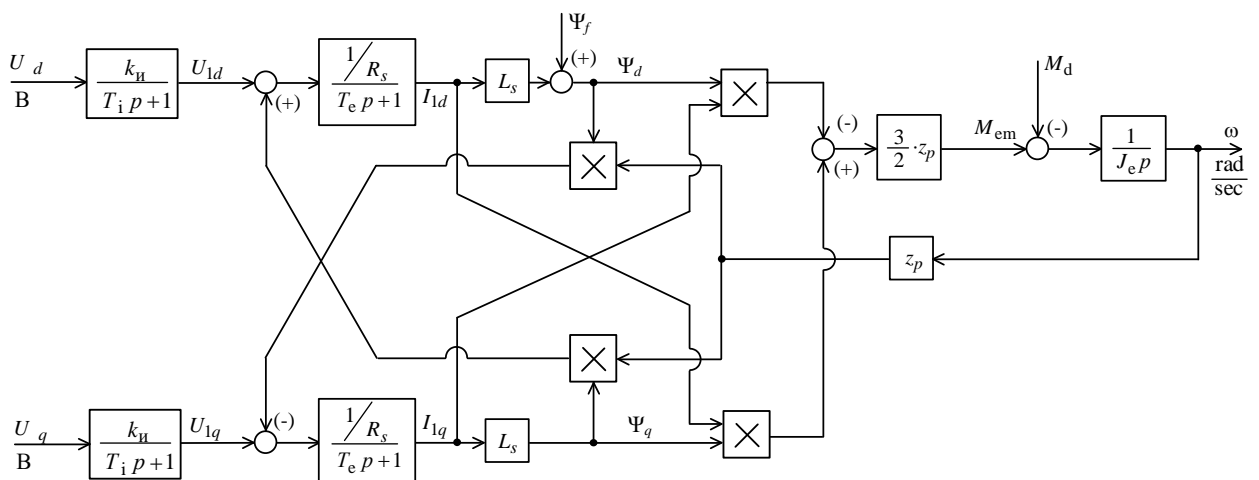


Figure 4 – Power channel block diagram

1.2.3 PWM simulating

Use of inverter in electric drive provides the most efficient methods of DC motors speed and torque control.

Autonomous voltage inverter is a control unit based on fully-controlled switches, such as transistors or gate turn-off thyristors.

Voltage inverters are compatible with both active and inductive load. They provide the system with given voltage value and curve thanks to special pattern of control pulses. Different PWM laws are used to control inverter switches: sin-wave, vector, etc. [3]

Generation process of PWM pulses for voltage inverter is based on comparing of input sine-wave signal with artificially generated saw-tooth wave signal in exploited model. Saw-tooth signal generated by bidirectional counter that counts from zero to timer period and vice versa. Timer period is considered as 100 and its frequency is n -times bigger than PWM frequency:

$$f_{timer} = f_{PWM} \cdot n = 10000 \cdot 100 = 1 \text{ MHz} \quad (5)$$

where $n=100$ – timer period.

Compare process proceeds as follows: comparison value is a sum of input sine-wave signal in a present moment of time and half of timer period:

$$cmp = U_i + \frac{N}{2} = U_i + 50, \quad (6)$$

where U_i - input sine-wave signal in a present moment of time.

When counter value is greater than comparison value, opening pulse is transferred to an upper transistor and when counter value is smaller than comparison value, opening pulse transferred to a lower transistor. Diagram that shows this process is presented in Figure 5.

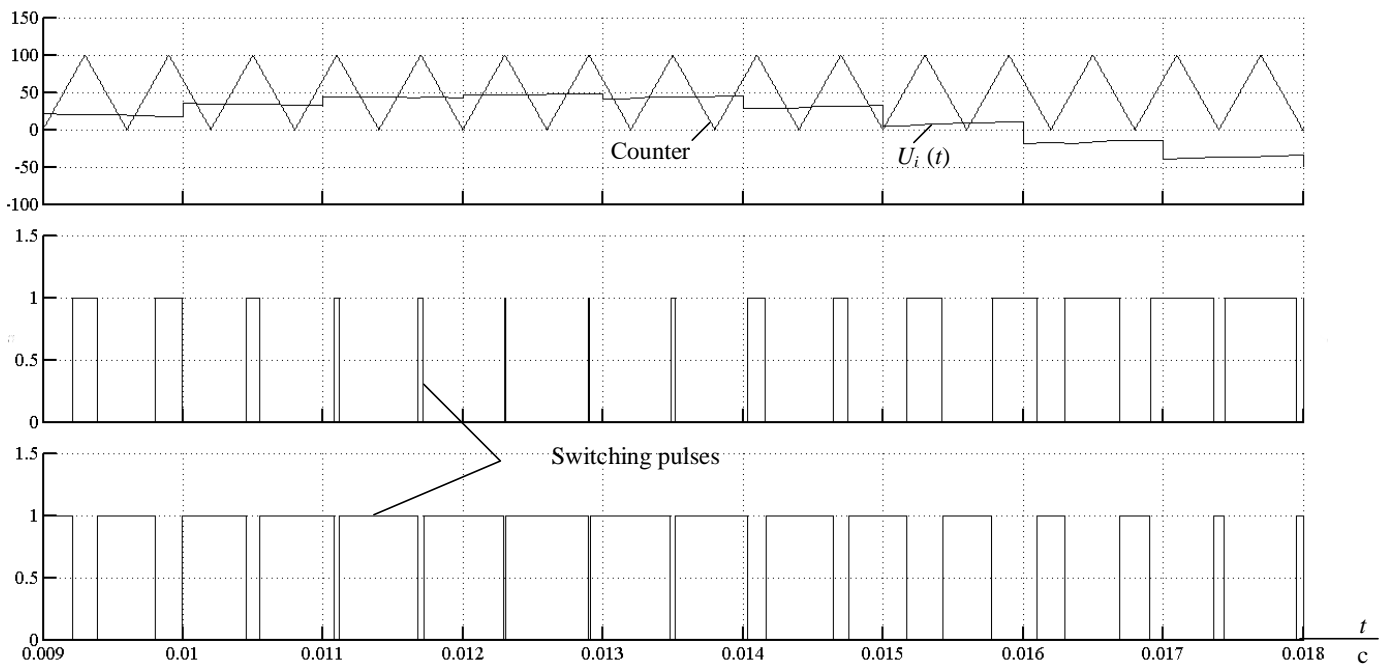


Figure 5 – Diagram of PWM signals formation

Figure 6 shows three-phase IGBT-bridge and Figure 7 – model of PWM pulse sources. Input sine-wave signals are sent to contacts IN_A, IN_B, IN_C. Pulse sources PWM_A, PWM_B и PWM_C give an opening signal *outH* to high transistors control outputs and *outL* to low transistors control outputs. Simulated converter differs from standard MATLAB converters, so that it can take an dead time into account [4,5].

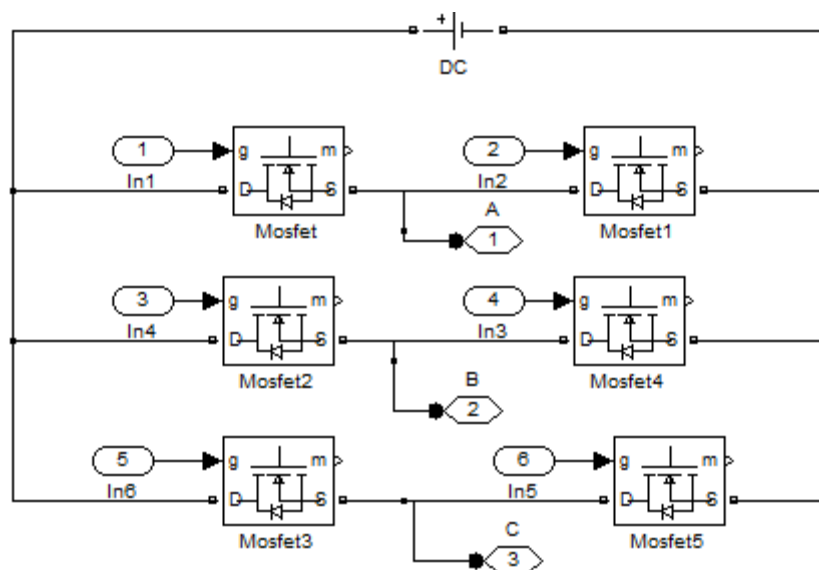


Figure 6 – Three-phase IGBT-bridge

Control pulses are sent to transistors from PWM generator, which is based on S-Function and presented in Figure 7.

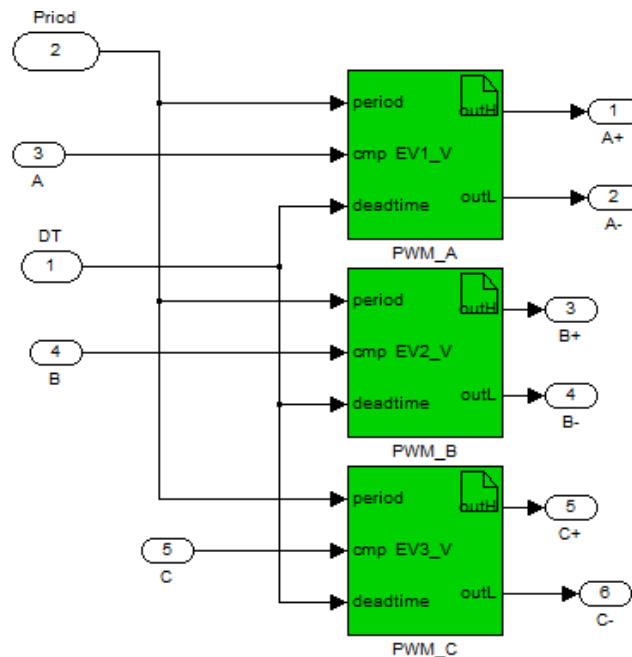


Figure 7 – PWM generation block

Software sources for blocks PWM_A, PWM_B and PWM_C are presented below:

[6]

PWM_A:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;
unsigned int compare=0;
compare = cmp[0]+period[0]/2;
if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;
if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;
if (counter>compare)
{
    outH[0]=1;
    outL[0]=0;
}
else
{
    outH[0]=0;
    outL[0]=1;
}

if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
{
    outL[0]=0;
    outH[0]=0;
}

```

PWM_B:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;

```

```

unsigned int compare=0;

compare = cmp[0]+period[0]/2;
if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;
if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;
if (counter>compare)
{
    outH[0]=1;
    outL[0]=0;
}
else
{
    outH[0]=0;
    outL[0]=1;
}
if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
{
    outL[0]=0;
    outH[0]=0;
}

```

PWM_C:

```

unsigned int static counter=0;
unsigned int static direction=0;
unsigned int compare=0;
compare = cmp[0]+period[0]/2;
if (direction==0) counter=counter+1; else counter=counter-1;
if (counter<1) direction=0;
if (counter>=period[0]) direction=1;
if (counter>compare)
{
    outH[0]=1;
    outL[0]=0;
}
else
{
    outH[0]=0;
    outL[0]=1;
}
if (counter>compare) if (counter<=(compare+deadtime[0]))
{
    outL[0]=0;
    outH[0]=0;
}

```

1.2.4 Coordinate converter simulation

Simulation will be performed in MATLAB Simulink using S-function builder, which allows implementing on a digital processor.

The following coordinates converters needed for vector control system: Clarke's converter, which converts three-phase fixed coordinate system to fixed Cartesian system, Park-Gorev converter, which converts Cartesian system to two-phase rotary system and inverse converters. Conversion from three-phase a, b, c system to Cartesian α , β system proceeds according to following equations:

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha} &= i_a, \\
 i_{\beta} &= \frac{i_a + 2 \cdot i_b}{\sqrt{3}}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Graphically this conversion can be described as it presented in Figure 8.

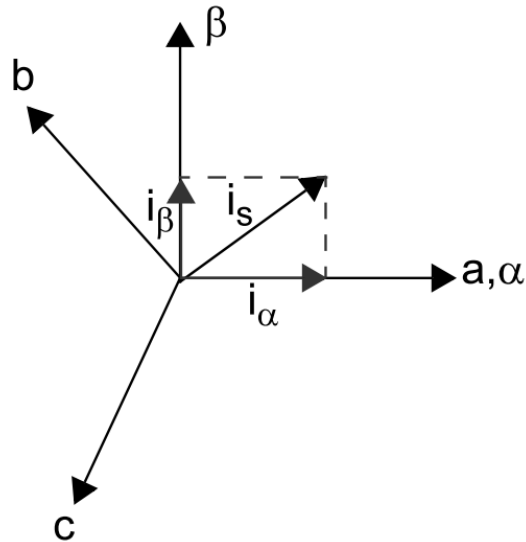


Figure 8 – Graphic illustration of Clarke’s transformation

To make this transformation possible in MATLAB, block “Clarke” was created. This block has two inputs (i_a , i_b) and two outputs (i_{alfa} , i_{beta}). It is presented in Figure 9.

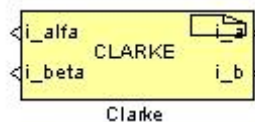


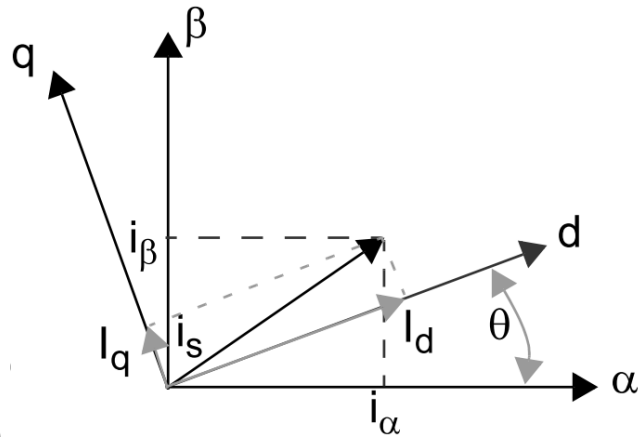
Figure 6 – Clarke’s transformation block in MATLAB Simulink

Currents transformation from static α , β system to rotary d , q system (Park-Gorev transformation) proceeds according to (8):

$$\begin{aligned}
 i_d &= i_{\alpha} \cdot \cos \theta + i_{\beta} \cdot \sin \theta, \\
 i_q &= -i_{\alpha} \cdot \sin \theta + i_{\beta} \cdot \cos \theta,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

where θ – position angle of flux vector, or angle between axis of rotary and static coordinate systems.

Graphically this conversion can be described as it presented in Figure



10.

Figure 70 – Graphic illustration of Park-Gorev transformation

To implement this transformation in MATLAB, block “Park” was created. This block has three inputs (park_alfa, park_beta, theta) and two outputs (park_X, park_Y). It is presented in Figure 11.

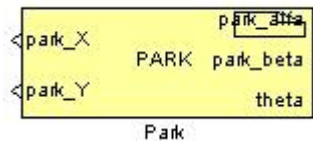


Figure 81 – Park-Gorev transformation block in MATLAB Simulink

Voltages transformation from rotary d, q system to static α, β system (inverse Park-Gorev transformation) proceeds according to (9):

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= i_d \cdot \cos \theta - i_q \cdot \sin \theta, \\ i_{\beta} &= i_d \cdot \sin \theta + i_q \cdot \cos \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Graphically this conversion can be described as it presented in Figure 12.

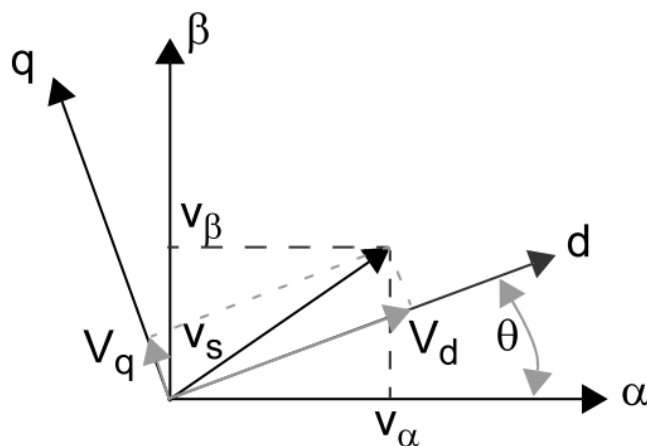


Figure 92 – Graphic illustration of inverse Park-Gorev transformation

To make this transformation possible in MATLAB, the block “Inverse_Park” was created. This block has three inputs (ipark_X, ipark_Y, theta) and two outputs (ipark_alfa, ipark_beta). It is presented in Figure 13

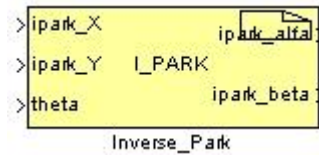


Figure 103 – Inverse Park-Gorev transformation block in MATLAB Simulink

Conversion from Cartesian α, β system to three-phase a, b, c system (inverse Clarke’s transformation) proceeds according to (10):

$$\begin{aligned}
 U_a &= U_\alpha, \\
 U_b &= \frac{-U_\alpha + \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2}, \\
 U_c &= \frac{-U_\alpha - \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Graphically this conversion can be described as it presented in Figure 14.

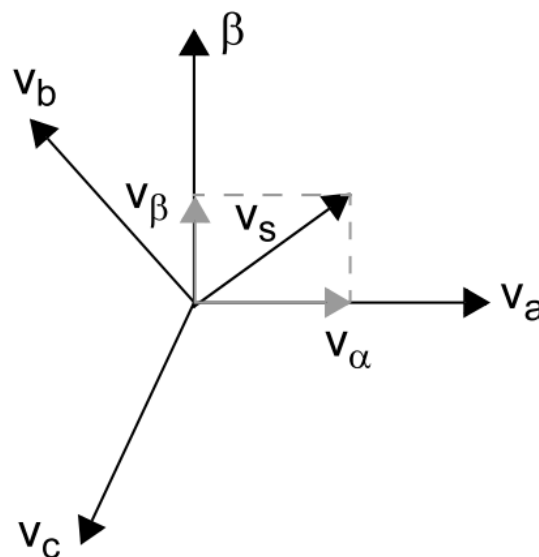


Figure 14 – Graphic illustration of inverse Clarke’s transformation

To make this transformation possible in MATLAB, block “Inverse_Clarke” was created. This block has two inputs (Ualfa, Ubeta) and three outputs (U_A, U_B, U_C). It is presented in Figure 15.

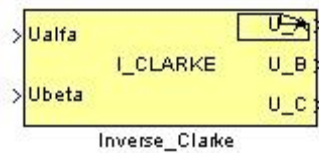


Figure 11 – Inverse Clarke’s transformation block in MATLAB Simulink

1.2.6 Encoder model implementation

It is necessary to simulate resolver and encoder to make the model as realistic as possible. Motor rotor position and basis signal with the frequency of 8kHz are input signals for the encoder. Complete rotor turn equals 360 degrees and if it is put on a timescale, it will form a sine wave and cosine wave, that are shifted by 90 degrees and their frequency equals to that of the rotor.

Resolver outputs two sine wave signals with frequency equals to basis resolver signal (8 kHz). Amplitudes of output signals are in proportion with rotor position, sine and cosine wave signals.

Rotor position time base should be modelled at first. This transformation will be implemented via S-function. Speed value is an input signal *in_speed* and two wave signals are output signals *out_sin*, *out_cos*, their frequencies are equal to rotor rotary speed. Basis signal with frequency of 8 kHz *out_TTTT* was plotted using S-function. Because basis signal changes two times per period, sample rate of S-function is 0.0000625 seconds.

This S-function is called “resolver” and presented in Figure 16. Reference speed value used as an input, and there are two signals that completed full turn in a second and differs from each other by 90 degrees. Oscilloscope “Scope” used to display outputs.

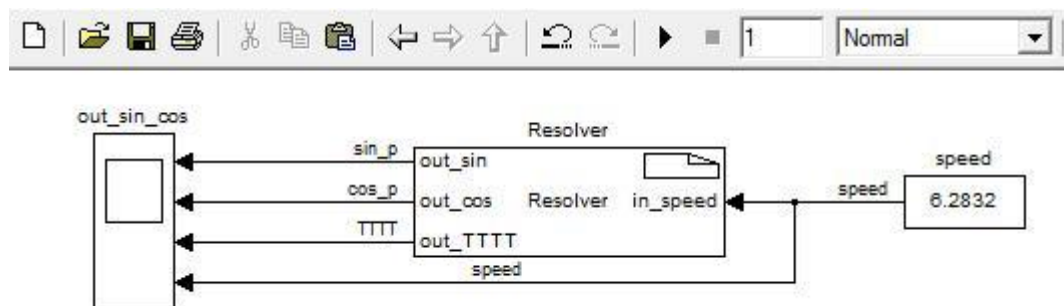


Figure 16 – Resolver simulated block

Control algorithm that contains variables declaration was written to “Output” tab in S-function. [7]

```

/*Block that converts speed to sine and cosine waves with frequency equal to rotor rotation speed
*/
//~~~~~
/*Variables description*/
int static speed = 0;
int static X = 0;
int static sin_signal = 0;
int static cos_signal = 0;
int static shag;
int static TTTT;
int static cc = 0;
//~~~~~
//in-----
/*Assign variables to S-fuction inputs.*/
speed = in_speed[0];
//in-----
//X-----
/*Timer modelling to plot sin and cos signals.*/
shag = 0.0000625;
X = X + shag;
if (X == 1)
    X = 0;
//X-----
//TTTT-----
/*Basis signal modelling.
*Using the counter to lower calculating frequency.*/
cc++;
if (cc == 1)
{
    TTTT = -1;
}
if (cc == 2)
{
    TTTT = 1;
    cc = 0;
}
//TTTT-----
//sin_&_cos-----
/*Calculating outputs sin and cos signals.*/
sin_signal = 50*sin(X*speed);
cos_signal = 50*sin(X*speed+(3.141592654/2));
//sin_&_cos-----
//out-----
/* Assign variables to S-fuction outputs.*/
//Assign output – sin-speed.
out_sin[0] = sin_signal;
//Assign output – cos-speed.
out_cos[0] = cos_signal;
//Assign output – basis signal.
out_TTTT[0] = TTTT;
//out-----

```

Out_sin and *out_cos* signals modelling is described in given algorithm. Frequency of these signals have to change in proportion with input *in_speed* value. The timer that is responsible for time-based signals sweep was modelled at first. Timer step equals to sampling frequency of S-function. Timer resets when it reaches 1. Basis sine wave signal is being modelled next. Equation that is responsible for output signal frequency was put under $\sin(x)$ function. Amplitude is multiplied by 50 in order to increase system sensitivity and accuracy.

Modelling resolver basis signal with frequency of 8 kHz is the next step of simulation. To do so, counter was implemented. This counter assigns high value to the signal during the first cycle and low value – to the second cycle, then it resets. Because of model frequency is 16 kHz and basis signal period is formed within two periods, output basis signal have desired frequency of 8 kHz.

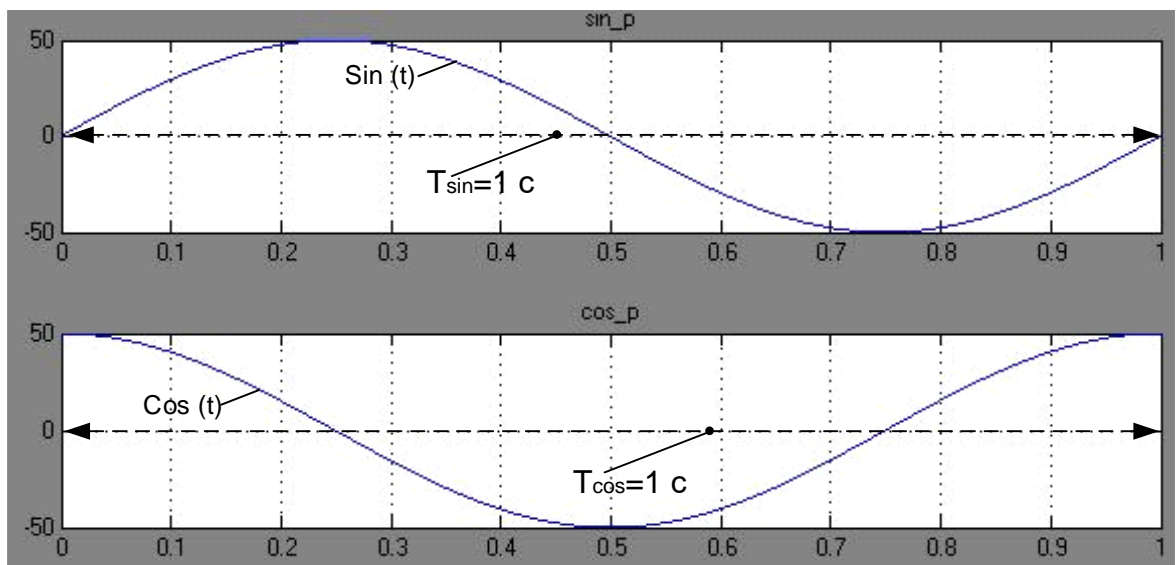


Figure 17 – Resolver sine and cosine wave signals oscillogram

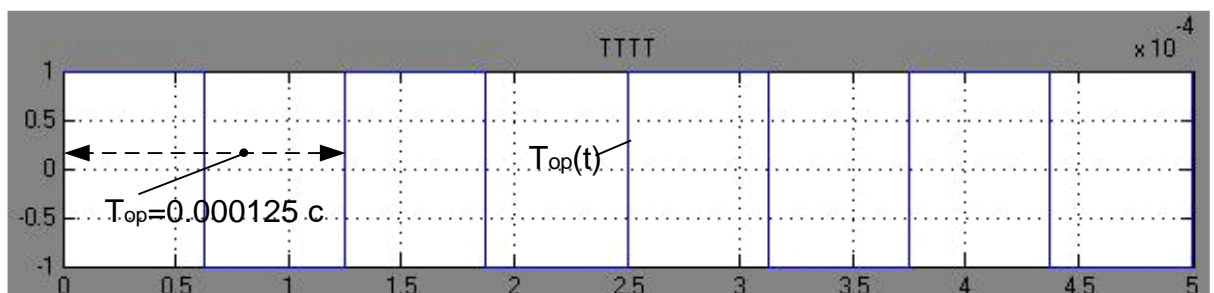


Figure 18 – Resolver basis signal oscillogram

Resolver output is a sine wave signal with the frequency of 8 kHz. In a real model it can be implemented using «sine wave» block from MATLAB libraries. To achieve this frequency, corresponding setting should be set to $8000 \cdot 2 \cdot \pi = 50265,48246$ rad/s.

To compare the basis signals, one of them is multiplied to rotor angle signals using «Product» block, which is shown in Fig. 19. Resolver signal that depends on rotor angle is produced as an output.

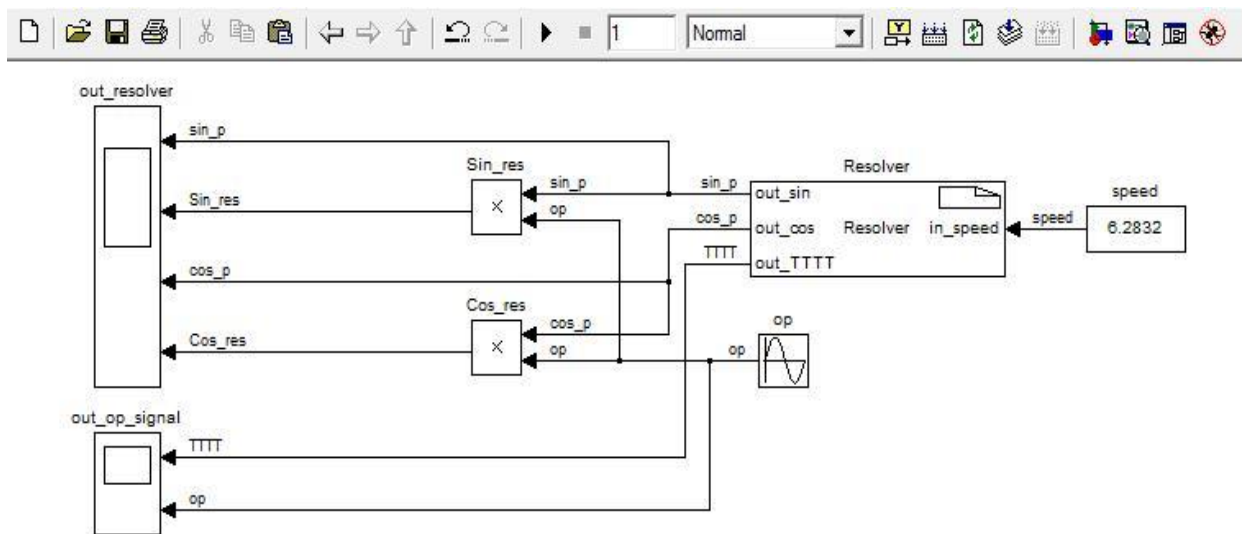


Figure 19 – Resolver model with outputs dependent on rotor position

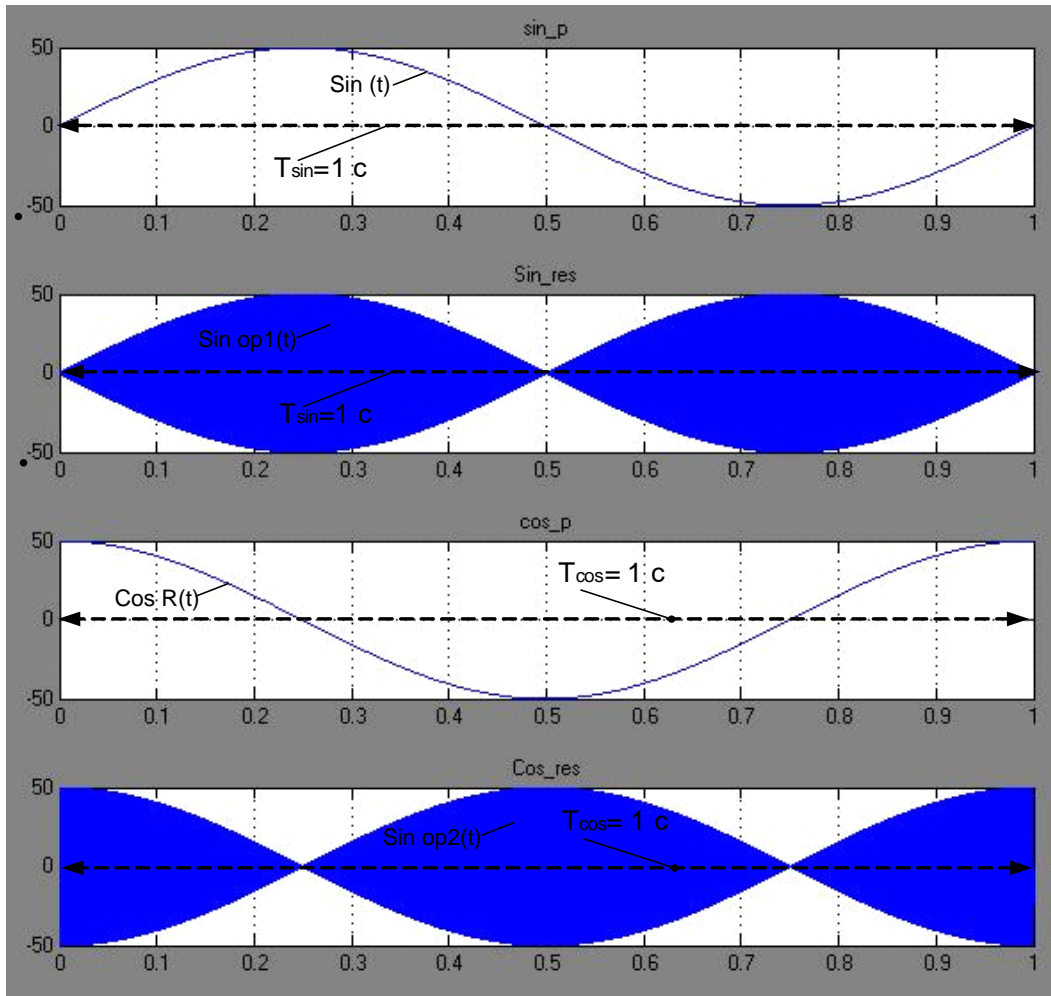


Figure 20 – Resolver outputs oscillogram

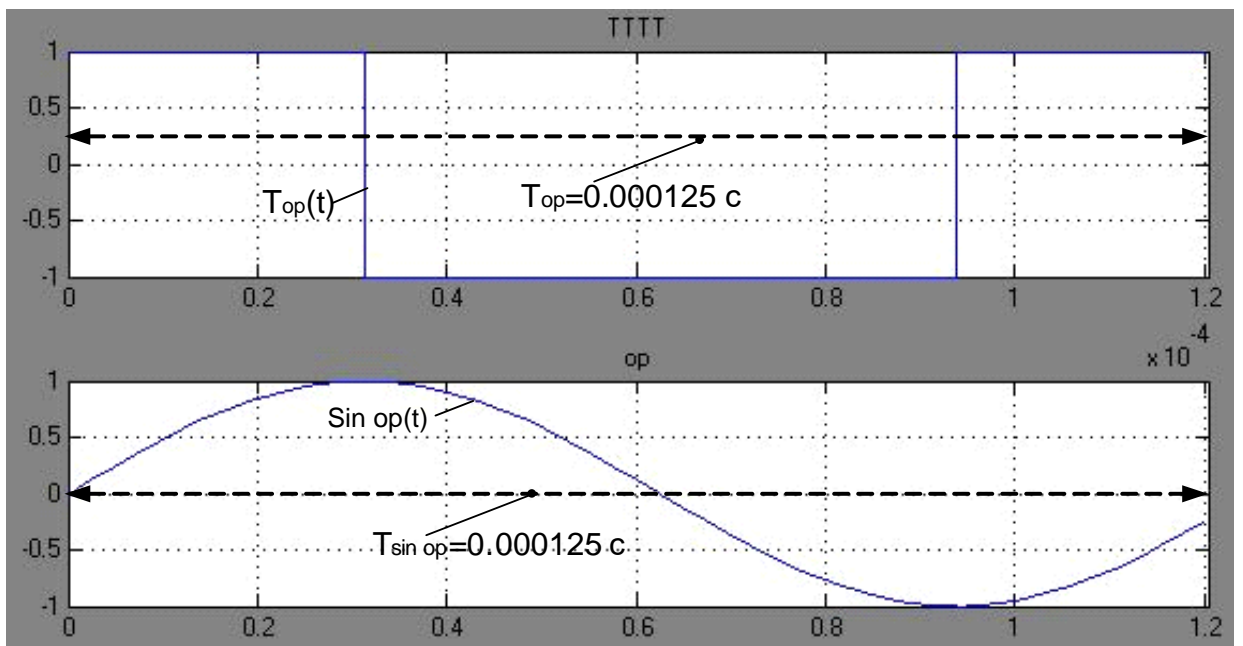


Figure 21 – Basis signals comparison

Oscillograms in Figure 20 show that models works as desired. Figure 21 shows that basis signals matched by time and frequency, which allows us to say that model is adequate.

1.2.7 Decoder model implementation.

It is necessary to decode given resolver signal and calculate rotor position. To do so, envelope curve that uses resolver signal was built and it makes it possible to restore original sine and cosine wave values. Using these values it is possible to calculate tangent and express the angle through using of arctangent function.

To make these conversions, S-function was built. There are two input signals with frequency of 8 kHz: *in_sin_res* and *in_cos_res* and two output signals *out_ch* and *out_ugol* that stand for quarter of revolution and the angle itself respectively. Also to plot monitoring graphs, sine (*out_sinH*, *out_sinL*) and cosine (*out_cosH*, *out_cosL*) waves envelopes were built on an output. Result signals were compared with *out_signal_sin* and *out_signal_cos*. Time sample was set to 0.0000625, as well as in «Resolver» block.

Signals from «Resolver» block output are used as inputs to this block, and its outputs go to the oscilloscope.

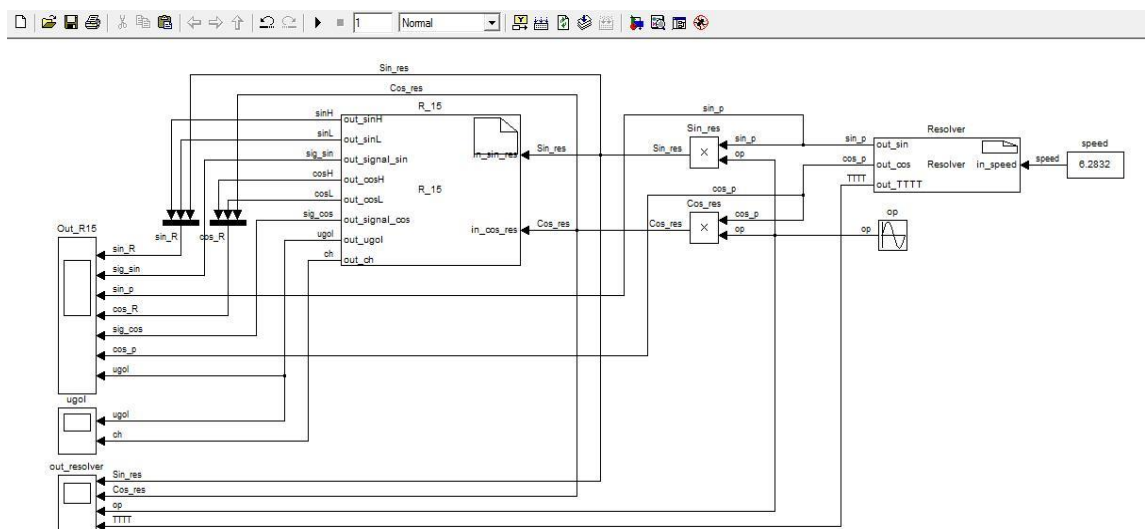


Figure 22 – Resolver and decoder model

Control algorithms were put into «Output» tab:


```
/*Block that calculates angle and revolution quarter using resolver data.*/
```

```
//~~~~~
```

```
/*Variables description */
```

```
int static sin_res = 0;  
int static cos_res = 0;  
int static signal_sin = 0;  
int static signal_cos = 0;  
int static S11 = 0;  
int static S12 = 0;  
int static C11 = 0;  
int static C12 = 0;  
int static ch = 0;  
int static P = 1;  
int tgA = 0;  
int at = 0;  
int A = 0;
```

```
///~~~~~
```

```
//in-----
```

```
/* Assigning variables to S-fucntion inputs.*/
```

```
//Assigning input sine signal from resolver ouput.
```

```
sin_res = (in_sin_res[0]);
```

```
//Assigning input cosine signal from resolver output.
```

```
cos_res = (in_cos_res[0]);
```

```
///in-----
```

```
//signal-----
```

```
/*Envelope plotting.
```

```
*Using the counter to synchronize with basis signal.*/
```

```
P++;
```

```
if (P == 1)
```

```
{  
    S11 = sin_res;  
    C11 = cos_res;  
}
```

```
if (P == 2)
```

```
{  
    S12 = sin_res;  
    C12 = cos_res;  
    P = 0;  
}
```

```
/*Initial speed recovery */
```

```
signal_sin = ((S12-S11)/2);
```

```
signal_cos = ((C12-C11)/2);
```

```
///signal-----
```

```
//ugol-----
```

```
/*Calculating the angle.*/
```

```
tgA = ((signal_sin)/(signal_cos));
```

```
at = atan(tgA);
```

```
A = ((at*180)/3.1415);
```

```
/*Lowering the period from 1/2 of revolution to 1/4 of revolution (pi/2).*/
```

```
if (A <= 0)
```

```
    A = A + 90;
```

```
if (A > 90) A = 90;
```

```
if (A < 0) A = 0;
```

```
//ugol-----
```

```
//ch-----
```

```

    /*Quarter calculating.*/
    if ((signal_sin > 0) && (signal_cos >= 0))
        ch = 1;
    if ((signal_sin >= 0) && (signal_cos < 0))
        ch = 2;
    if ((signal_sin < 0) && (signal_cos < 0))
        ch = 3;
    if ((signal_sin <= 0) && (signal_cos >= 0))
        ch = 4;
    ///ch-----
    //out-----
    /* Assign variables to S-fucntion outputs.*/
    //Assigning high peak of sine output.
    out_sinH[0] = S11;
    // Assigning low peak of sine output.
    out_sinL[0] = S12;
    // Assigning initial speed of sine output.
    out_signal_sin[0] = signal_sin;
    // Assigning high peak of cosine output.
    out_cosH[0] = C11;
    // Assigning low peak of cosine output.
    out_cosL[0] = C12;
    // Assigning initial speed of cosine output.
    out_signal_cos[0] = signal_cos;
    // Assigning angle output.
    out_ugol[0] = A;
    // Assigning quarter of revolution output.
    out_ch[0] = ch;
    ///out-----

```

The first code signal is responsible to high and low envelopes plotting for the signals. System is being set to maintain input signal amplitude. This setting uses counter described above. After that, there are high and low envelopes for sine and cosine waves. The initial value can be determined as average value between envelopes. Then, it is necessary to calculate the rotor position. For doing this, it is necessary to divide sine wave signal to cosine wave signal to get tangent value. Then, the rotor position could be expressed through arctangent and revolution period is divided into 4 quarters. Transition from quarters to angle makes it possible to determine specific quarter of rotor.

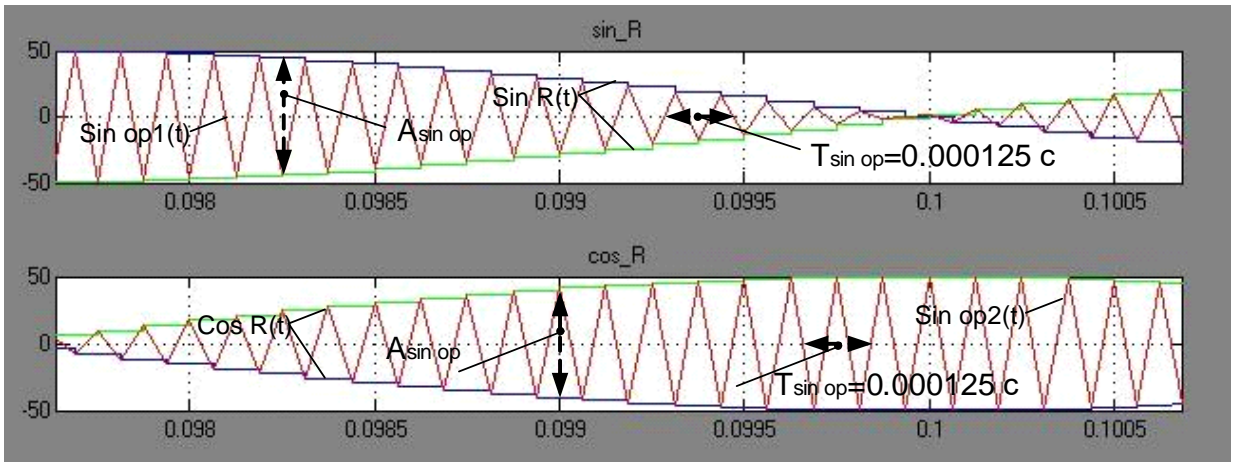


Figure 23 – Resolver outputs envelopes

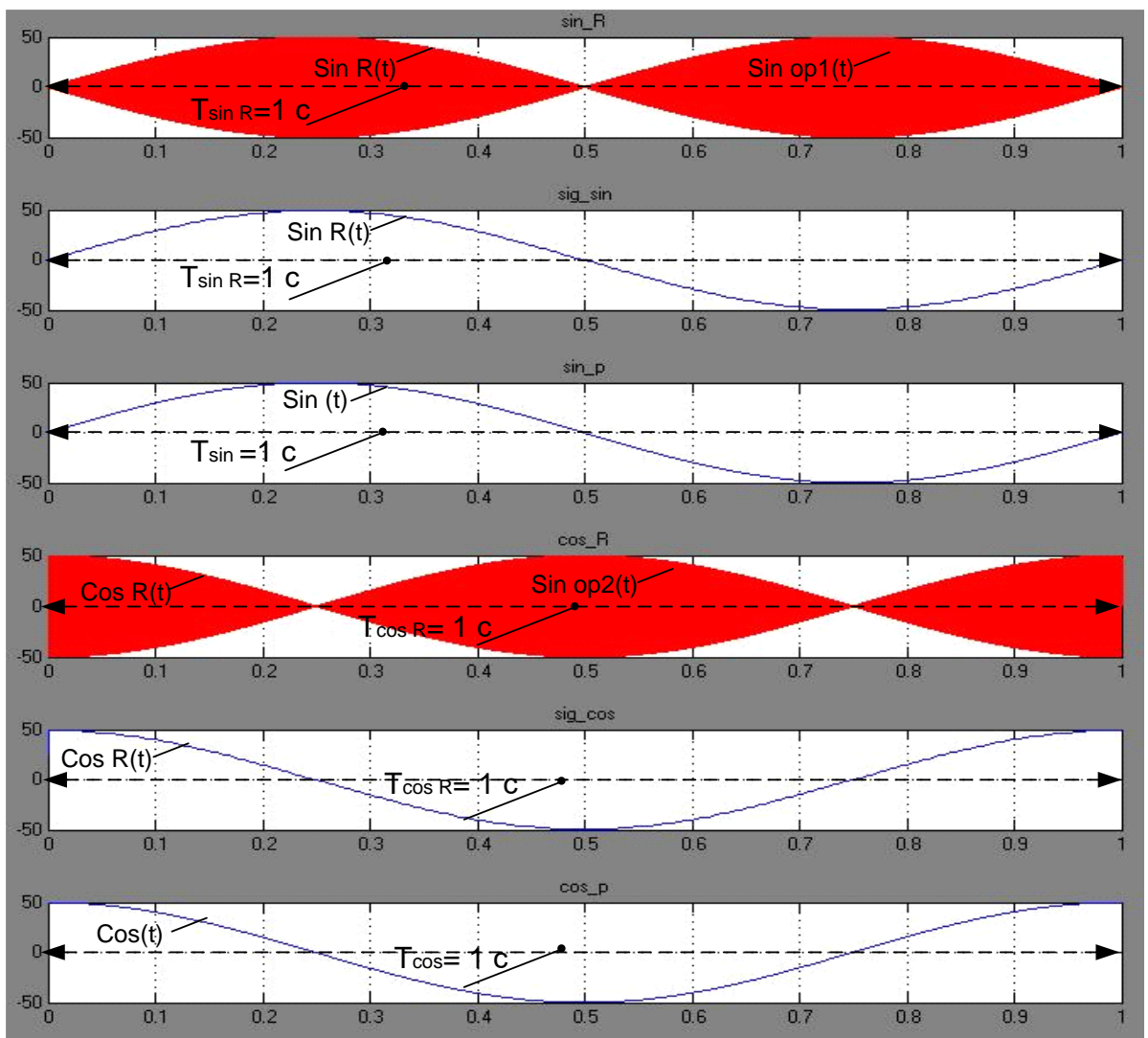


Figure 24 – Resolver outputs oscillograms

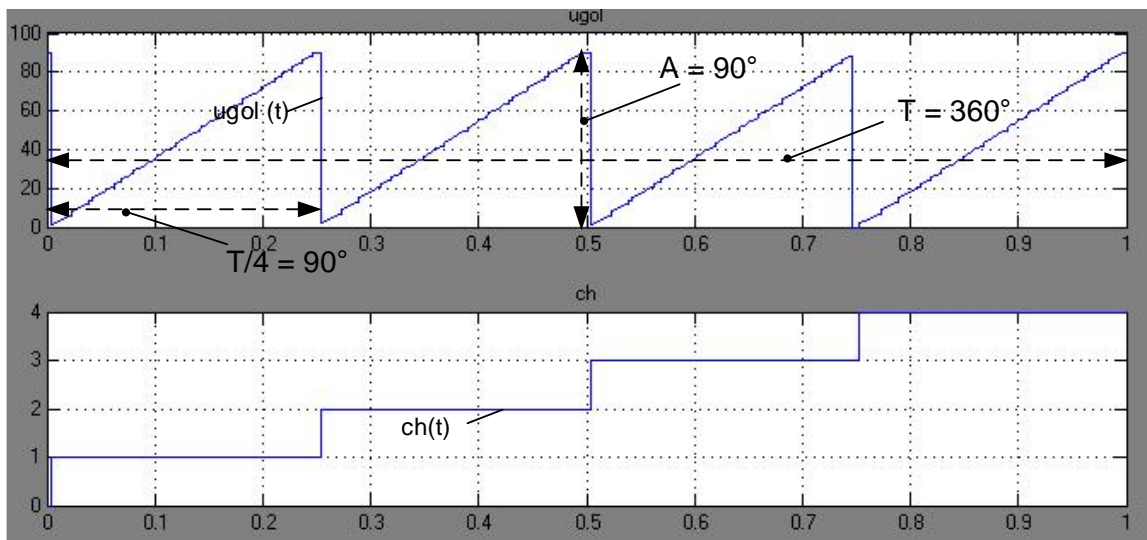


Figure 25 – Rotor position and quarter determination oscillograms

Conclusion

The simulation model of a microprocessor PMSM control system was developed. Main elements of control system were simulated. According to simulation presented model is adequate. The following results were obtained:

1. The technology of simulation model transition from ideal system to realistic one was introduced;
2. Research of realistic simulation model was carried out. The main disadvantages of modern systems are signal noise, and low accuracy of external disturbances response.

It was found that there is a possibility to solve the problems associated with modern drives without additional expenses. It was proposed to use current and speed controllers.

References

1. Chernyshev A. Yu. AC electric drive: textbook (2011).
2. Korelskiy D. V., Potapenko E. M., Vasilyeva E. V. SMPM modern control methods (2001): 155–159.
3. Ovchinnikov I. E. PMSM and PMSM-based electric drives for low and medium power: textbook (2006).
4. Kuo B. C. Automatic control systems (1986).
5. Povlenko A. M., Butusov P. N. – MATLAB for students (2005).
6. Deytel H, Deytel P. C+ How to Program (1999).
7. Educational mathematical website [Electronic source]. – <http://www.exponenta.ru>.

