

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Г. Б. Масальский

подпись

инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Разработка сервопривода на базе синхронного двигателя

Руководитель

подпись, дата

ст. преподаватель
должность, ученая степень

А. А. Гагарский
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Н. А. Созинов
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

В. Н. Куликова
инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г.Б. Масальский
«_____» _____ 2018 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		2

Студенту Созинову Никите Андреевичу

Группа ФЭ14-08Б Направление (специальность) 15.03.06 (Мехатроника и робототехника)

Тема выпускной квалификационной работы: Разработка сервопривода на базе синхронного двигателя

Утверждена приказом по университету № 2264/с от 14.02.18

Руководитель ВКР: А.А. Гагарский, старший преподаватель каф. РИТК

Исходные данные для ВКР:

Синхронный двигатель Baldor brushless ac servomotor BSM50A-233AEA, силовая плата с модулем PM30CSJ060, программируемая плата с микроконтроллером ATXMEGA128A4U, ноутбук ASUS K46CM

Перечень разделов ВКР:

Глава 1. Сервопривод на базе электродвигателя.

Глава 2. Обзор современных методов управления синхронным двигателем с постоянными магнитами.

Глава 3. Разработка системы управления.

Глава 4. Безопасность и экологичность проекта.

Глава 5. Экономическое обоснование проекта.

Перечень графического материала:

Лист 1. Плата согласования. Схема электрическая принципиальная.

Лист 2. Структурная схема системы векторного управления.

Лист 3. Блок схемы: алгоритмы обработки прерываний АЦП (каналы 0 и 1), главный алгоритм системы управления.

Лист 4. Блок схемы: алгоритм вычисления скорости ротора, алгоритм вывода значений через UART интерфейс.

Лист 5. Полученные графики преобразований Парка и Кларка.

Руководитель ВКР

Гагарский А.А.

Задание принял к исполнению

Созинов Н.А.

«____»____2018 г

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка сервопривода на базе синхронного двигателя» содержит 94 страницы текстового документа, 33 приложения, 10 использованных источников, 5 листов графического материала.

ВЕНТЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, СЕРВОПРИВОД, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ.

Задачи проекта:

- изучить методы управления бесколлекторными двигателями;
- выбрать метод управления синхронным двигателем с постоянными магнитами;
- разработать программное обеспечение микроконтроллера для реализации выбранного метода;
- протестировать работу разработанной системы управления.

Актуальность данной работы заключается в накоплении компетенций в области сервопривода на базе синхронного двигателя, для образовательных целей и проведения дальнейших работ в развитии этого направления.

Для разработки сервопривода на базе синхронного двигателя было использовано следующее программное обеспечение: Atmel studio 6.1, Mathworks Matlab, Microsoft Visio 2016, Atmel Flip 3.4.7, Putty.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Сервопривод на базе электродвигателя.....	8
1.1 Электрические машины в сервоприводе.....	9
1.2 Синхронный двигатель с постоянными магнитами.....	12
1.3 Постановка задачи.....	19
2 Обзор современных методов управления СДПМ.....	20
2.1 Принципы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами.....	24
2.2 Векторное управление асинхронным двигателем.....	28
2.3 Векторное управление синхронным двигателем.....	30
3 Разработка системы управления.....	32
3.1 Синхронный двигатель с постоянными магнитами.....	33
3.2 Силовая плата с модулем PM30CSJ060.....	34
3.3 Плата с микроконтроллером.....	35
3.4 Датчики тока.....	36
3.5 Датчик положения ротора.....	38
3.6 Программирование преобразований Парка и Кларк.....	39
3.7 Описание программы.....	45
3.8 Результаты разработки.....	47
4 Безопасность жизнедеятельности.....	49
5 Технико-экономическое обоснование проекта.....	54
5.1 Расчет затрат на основное оборудование и программное обеспечение.....	54
5.2 Расчет фонда заработной платы разработчикам.....	56
5.3 Затраты на электроэнергию.....	59
5.4 Затраты на амортизацию оборудования.....	59
5.5 Расходы на аренду помещения.....	60
5.6 Смета затрат.....	61
5.7 Выводы по разделу.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	Ошибка! Закладка не определена.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

ВВЕДЕНИЕ

На современном уровне автоматизация систем управления производством представляет собой многоуровневую схему взаимодействия людей и машин на основе систем автоматического сбора данных и сложных вычислительных комплексов, которые неустанно совершенствуются.

Технический прогресс и конкуренция приводят к постоянному росту производительности и повышению степени автоматизации технологического оборудования. Уровень автоматизации производственных процессов, производительность труда и качество выпускаемой продукции определяется силовой электровооруженностью труда, основу которой составляют регулируемые электрические машины (ЭМ). При этом возрастают требования, предъявляемые к регулируемым электроприводам, по таким параметрам, как диапазон регулирования частоты вращения, точность позиционирования и перегрузочная способность.

Для обеспечения предъявляемых требований разработаны высокотехнологичные устройства современного электропривода - сервоприводы. Это такие системы привода, которые в широком диапазоне регулирования скорости гарантируют высокоточные процессы движения и реализуют их хорошую повторяемость. Сервоприводы являются наиболее высокотехнологичной ступенью электропривода.

Прогресс в электронике и появление новых электротехнических материалов изменили ситуацию в области сервоприводной техники. Последние достижения позволяют компенсировать сложность управления приводом переменного тока с помощью современных микроконтроллеров и быстродействующих высоковольтных силовых транзисторов. Постоянные магниты, изготовленные из сплавов неодим-железо- бор и самарий-кобальт, благодаря их высокой энергоемкости, существенно улучшили характеристики синхронных двигателей с магнитами на роторе при одновременном снижении массогабаритных показателей. В итоге

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

улучшились динамические характеристики привода при снижении его габаритов.

В общем случае сервопривод - представляет собой подвижную систему с обратной связью, позволяющей точно управлять перемещением и задавать требуемый алгоритм движения. Перемещение в составе сервопривода может обеспечивать любая силовая машина.

Главные части сервопривода - это его двигатель, элементы управления и передача. Кроме того, в нем есть также более мелкие и периферийные устройства - блокировка, сигнализация, система включения/выключения, элементы обратной связи.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 Сервопривод на базе электродвигателя

В промышленности на каждом шагу встречаются технологические операции, требующие контролировать перемещение рабочего органа, его линейную или угловую скорость, а также прикладываемое усилие. В большинстве случаев реализация такой задачи ложится на плечи сервопривода на базе электрической машины, т.к. это очень гибкое и удобное решение, не требующее дополнительной инфраструктуры, как пневматика и гидравлика.

В среднем у производителей сервоприводов диапазон мощностей попадает в рамки от 50Вт до 15кВт. Для современных сервоприводов характерны следующие показатели:

- управление по позиции, регулирование скорости, вращающего момента серводвигателя;
- диапазон регулирования скорости до 1:10000;
- статическая точность поддержания скорости вращения вала двигателя до 0,01%;
- погрешность при поддержании позиции вала двигателя менее $\pm 2-3$ дискрет энкодера;
- разрешение энкодера до 24бит;
- возможность использования в среде, склонной к взрыву (из-за отсутствия искрящих деталей);
- наличие различных исполнений серводвигателей в зависимости от сферы применения, такие как низкоинерционное, среднеинерционное, исполнение для применения прямого привода, линейные двигатели;
- большая способность к перегрузочной устойчивости;
- КПД более 90%;
- длительный срок эксплуатации и высокая надежность.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.1 Электрические машины в сервоприводе

Сервопривод может быть реализован на базе различных электрических машин, например, двигатель постоянного тока (ДПТ), асинхронный двигатель (АД), синхронный двигатель (СД), шаговый двигатель (ШД), вентильный реактивный двигатель (ВРД).

В настоящее время особой популярностью пользуются асинхронные и синхронные сервоприводы.

Двигатель постоянного тока. ДПТ нашел широкое применение в различных областях деятельности человека – начиная от использования тягового привода, применяемого в трамваях и троллейбусах, заканчивая приводом прокатных станов, подъемных механизмов, станков с ЧПУ, где требуется управление скоростью или положением вала с высокой точностью. Однако, сложность и стоимость изготовления, а также необходимость в регулярном обслуживании из-за применения электромеханической коммутации (щеточно-коллекторного узла), зачастую заставляет отказаться от применения этого типа электрической машины в современных разработках.

Асинхронный электродвигатель является самым массовым в промышленности благодаря простой и надежной конструкции при невысокой цене. Однако этот тип двигателя является сложным объектом управления с точки зрения регулирования момента и частоты вращения. Применение высокопроизводительных микроконтроллеров, реализующих векторный алгоритм управления, и цифровых датчиков скорости с высокой разрешающей способностью, позволяют приблизиться к характеристикам синхронного сервопривода. С точки зрения стоимости асинхронный сервопривод имеет неоспоримое превосходство при больших мощностях.

Синхронные двигатель. Синхронная машина в сервоприводе на сегодняшний день – это, обычно, трехфазный синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) и фотоэлектрическим датчиком положения ротора (ДПР). Наличие ДПР и микропроцессорной

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

системы управления позволяет получить управляемость характерную ДПТ без проблем со щеточно-коллекторным узлом. СДПМ занимает промежуточное место между АД и ДПТ, т.к. с одной стороны проще в изготовлении, чем ДПТ, а с другой дороже АД.

Шаговый двигатель. Другим вариантом точного позиционирования приводимых элементов без датчика обратной связи является применение шагового двигателя. В этом случае схема управления отсчитывает необходимое количество импульсов (шагов). При этом точное позиционирование обеспечивается параметрическими системами с отрицательной обратной связью, которые образуются взаимодействующими между собой соответствующими полюсами статора и ротора шагового двигателя. Сигнал задания для соответствующей параметрической системы формирует система управления шаговым двигателем, активизирующая соответствующий полюс статора.

Вентильный реактивный двигатель. ВРД — это бесколлекторная синхронная машина, на обмотки статора которой подаются импульсы напряжения управляемой частоты, создающие вращающееся магнитное поле. Вращающий момент возникает за счет стремления ротора к положению, при котором магнитный поток статора проходит по оси ротора, изготовленного из магнитомягкого материала, с наименьшим магнитным сопротивлением. Основным преимуществом вентильных реактивных машин является то, что ослабления магнитного поля происходит естественным образом при снижении тока возбуждения. Это свойство дает им большое преимущество в диапазоне регулирования при скоростях выше номинальной (диапазон устойчивой работы может достигать 10:1). Высокая эффективность присутствует у таких машин при работе на высоких скоростях и с малыми нагрузками. Также ВРД способны обеспечить удивительно постоянную эффективность в довольно широком диапазоне регулирования.

Для поддержания магнитного поля в ВРД необходимы токи возбуждения, что уменьшает плотность мощности по сравнению с

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

электрическими машинами с постоянными магнитами (ПМ). Однако они все же имеют габаритные размеры меньшие, чем обычные АД.

ВРД имеет коэффициент мощности меньший, чем СДПМ или АД, но его преобразователю не нужно создавать выходное напряжение синусоидальной формы для эффективной работы машины, соответственно такие инверторы имеют меньшие частоты коммутации. Как следствие – меньшие потери в инверторе. Основными недостатками вентильных реактивных машин являются наличие акустических шумов и вибрации, а также пульсаций момента.

Оптимальным вариантом для точного управления механизмами в области станков с ЧПУ, промышленных роботов и других устройств автоматизации производства с повышенными требованиями к качеству управления является СДПМ. ДПТ уступает в надежности и требует регулярного обслуживания, АД и ВРД имеют проблемы с моментом на минимальной скорости вращения, а ШД уступает в целом списке параметров.

Таблица 1 – Сравнение характеристик электрических машин

Характеристика	ДПТ	АД	СДПМ	ШД	ВРД
Стоимость ЭМ		+		++	++
Стоимость привода	++			++	+
Обслуживание		++	++	++	++
Взрывобезопасность		++	++	++	++
Диапазон регулирования скорости	++	+	++		++
Пульсации момента	++	++	++		
Перегрузочная способность	++	+	++		+
КПД ЭМ	++	+	++		+
КПД привода	++	+	+	+	++
Надежность		++	+	+	++
Сложность реализации УУ	++	+	+		+

1.2 Синхронный двигатель с постоянными магнитами

СДПМ представляет собой электрическую машину переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля. Статор такого двигателя, подобный по конструкции статору асинхронного двигателя (АД), содержит трёхфазную обмотку. На его роторе расположены постоянные магниты, и в зависимости от их расположения различают два вида СДПМ, а именно: двигатели с магнитами, расположенными непосредственно на поверхности ротора, в англоязычной литературе именуемые *surface mounted permanent magnet motor*, и двигатели с магнитами, расположенными в стали ротора (*interior mounted permanent magnet motor*). СДПМ обычно выполняются на небольшую мощность (до нескольких десятков киловатт) и наиболее часто применяются в сервоприводах совместно с преобразователями частоты (ПЧ) [1]. Но также известны и разработки СДПМ для тягового электропривода мегаваттной мощности [2].

СДПМ всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. Появление соответствующей преобразовательной и цифровой вычислительной техники позволяет применять СДПМ как альтернативу ДПТ в регулируемом электроприводе. Существенный толчок дало внедрение преобразователей на транзисторах с изолированным затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*) и использование принципов ШИМ (*Pulse Width Modulation (PWM)*) [3, 4, 5].

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Конструкция СДПМ изображена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 - Конструкция СДПМ

На рисунке 1.1 ротор имеет 10 пар постоянных магнитов и с помощью подшипников надевается на ступицу ротора. Обмотка статора состоит из сердечника и стержневой обмотки, статор неподвижно крепится в корпус.

Явнополюсная и неявнополюсная синхронная машина. Все синхронные машины можно разделить на два вида. Первый из них это синхронные машины, у которых ротор выполнен с неявно выраженными полюсами. Это, как правило, высоко-оборотистые машины с парой полюсов.

Неявнополюсная машина обладает плавностью вращения на любой частоте вращения.

Второй вид - явнополюсная (с явно выраженными полюсами) машина. Ротор выполнен с неявно выраженными полюсами, обычно 4 и более. Чем больше у такой машины полюсов, тем сильнее ее момент.

Статор. Статор имеет традиционную конструкцию и похож на статор асинхронной машины. Он состоит из корпуса, сердечника из электротехнической стали и медной обмотки, уложенной в пазы по периметру сердечника. Количество обмоток определяет количество фаз двигателя. Для самозапуска и вращения достаточно двух фаз - синусной и косинусной. Обычно ВД трёхфазные, реже - четырёхфазные.

По способу укладки витков в обмотки статора различают двигатели, имеющие обратную электродвижущую силу трапецеидальной (BLDC) и синусоидальной (BLAC) формы. По способу питания фазный электрический ток в соответствующих типах двигателя также изменяется трапецеидально или синусоидально.

Ротор. Ротор изготавливается с использованием постоянных магнитов и имеет обычно от двух до восьми пар полюсов с чередованием северного и южного полюсов.

Вначале для изготовления ротора использовались ферритовые магниты. Они распространены и дешевы, но им присущ недостаток в виде низкого уровня магнитной индукции. Сейчас получают популярность магниты из сплавов редкоземельных элементов, так как они позволяют получить высокий уровень магнитной индукции и уменьшить размер ротора.

Электронный коммутатор. Коммутатор - это переключающее устройство, состоящее из полупроводниковых приборов и предназначенное для согласованной коммутации фаз бесколлекторного двигателя по сигналам датчика положения ротора (ДПР) или другим сигналам, выявляющим это положение. Ключ - полупроводниковый переключатель, являющийся составной частью коммутатора и предназначенный для подключения, отключения или реверсирования тока в фазах (секциях) обмотки бесколлекторного двигателя. Чаще всего в качестве ключей применяются транзисторы и полностью управляемые тиристоры. Применяемые в коммутаторах транзисторы, работающие в режиме ключа, могут быть в двух состояниях: полностью открытом (насыщение) и полностью закрытом (отсечка).

Так как полевые транзисторы управляются напряжением, ток управления при этом очень мал по сравнению с током управления биполярных транзисторов. Таким образом, преимущества полевых транзисторов заключаются в возможности управления сигналом по напряжению при низком

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

уровне тока затвора и в том, что времена включения и отключения прибора очень малы (в биполярных из-за наличия неосновных носителей имеет место время рассасывания, что обуславливает задержку выключения транзистора), соответственно, тепловые потери малы. Ключи на запираемых тиристорах применяются, по большей части, в цепях электрических машин средней и большой мощности, для малых мощностей двигателей они имеют второстепенное значение по сравнению с ключами на транзисторах.

Датчик положения ротора. Датчик положения ротора (ДПР) - это информационный узел в системе управления бесколлекторным двигателем, предназначенный для определения относительного положения магнитной оси ротора и эквивалентной магнитной оси статора и выдачи соответствующих сигналов для управления схемой коммутатора. Для датчика положения ротора применяются чувствительные элементы, действие которых определяется физическим эффектом, который основан на реакции элемента на приближение некоторой массы, связанной с ротором. Наибольшее распространение получили оптические, гальваномагнитные и индукционные типы датчиков положения.

Датчики оптического типа (с фотоэлектронными приборами) имеют простую конструкцию якоря в виде тонкого диска с прорезями. Чувствительные элементы (например, фотодиоды) располагаются на одной линии по радиусу, и для каждого ЧЭ применяется своя прорезь на экране-роторе. Недостатками данного вида датчиков является низкий уровень выходного сигнала и ненадежность ввиду возможности загрязнения поверхности элемента.

Датчики индуктивного типа надежные, простые и экономичные. Недостаток этих датчиков - необходимость вынесения их в отдельный узел в конструкции машины.

Наибольшее распространение в системах управления машинами небольшой мощности получили датчики гальваномагнитного типа (элементы

Холла, магнитодиоды, магниторезисторы), когда в качестве якоря используется силовой магнит ротора двигателя. Чувствительные элементы располагаются в зазоре машины. Конструкция двигателя в таком случае не усложняется за счет специального конструктивного элемента, которым обычно является ДПР. В схеме с датчиками гальваномагнитного типа чаще всего нет необходимости в дополнительном источнике питания датчика.

Устройство управления. Устройство управления анализирует сигналы с ДПР и принимает решение, какие ключи замыкать с помощью электронного коммутатора. В большинстве случаев устройством управления является микроконтроллер.

Микроконтроллер - большая интегральная схема, структура которой содержит все функциональные узлы, необходимые для обеспечения автономной работы в качестве вычислительного или управляющего устройства. На кристалле микроконтроллера располагаются: процессор, блоки постоянной и оперативной памяти (ПЗУ и ОЗУ), периферийные устройства различного типа, блоки управления и синхронизации, а также могут располагаться и другие блоки. В периферийные устройства входят порты ввода/вывода, на которые поступают входные сигналы и с которых выводятся выходные сигналы. Микроконтроллеры чаще всего используются в составе сложных устройств. Их можно рассматривать как электронную систему, которая обрабатывает входные сигналы и выдает выходные сигналы. Эти сигналы могут быть аналогового и цифрового типа (одиночные сигналы, коды, последовательности кодов). Сигналы могут храниться внутри системы. Микроконтроллеры относятся к цифровым устройствам, поэтому вся информация в них хранится в цифровом виде, если поступает аналоговый сигнал на вход микроконтроллера, то он с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуется в последовательности цифровых кодов, а на выходе находится цифро-аналоговый преобразователь, который преобразует выходной цифровой сигнал в аналоговый.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Для выполнения операций в микроконтроллер загружается программа, которая представляет собой набор инструкций (цифровых кодов). Процессор распознает эти коды и приступает к выполнению заданных операций. Команды, которые может выполнять процессор, образуют систему команд, структура которых определяет быстродействие и гибкость процессора. Для выполнения команд в микропроцессоре находится арифметико-логическое устройство (АЛУ), внутренние регистры, буферы и другие узлы. Внешний тактовый сигнал синхронизирует работу устройств. Составные устройства микроконтроллера связаны общей системной шиной (системной магистралью). Характеристики микроконтроллеров: производительность, объём памяти, разрядность, набор инструкций и наличие функциональных элементов ЦПУ (математические операции). В системах управления робототехническими устройствами широко применяются микроконтроллеры с усовершенствованной RISC архитектурой (ARM), которые хорошо изучены и наиболее распространены.

Принцип работы СДПМ. Принцип работы СДПМ основан на том, что микроконтроллер коммутирует обмотки статора так, чтобы вектор магнитного поля статора всегда был ортогонален вектору магнитного поля ротора. С помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) контроллер управляет током, протекающим через обмотки статора, т.е. вектором магнитного поля статора, и таким образом регулируется момент, действующий на ротор синхронного двигателя. Знак угла между векторами определяет направление момента, действующего на ротор.

Коммутация производится так, что поток возбуждения ротора поддерживается постоянным относительно потока якоря. В результате взаимодействия потока якоря и возбуждения создаётся вращающий момент, который стремится развернуть ротор так, чтобы потоки якоря и возбуждения совпали, но при повороте ротора под действием ДПР происходит переключение обмоток и поток якоря поворачивается на следующий шаг.

В этом случае и результирующий вектор тока будет сдвинут и неподвижен относительно потока ротора, что и создаёт момент на валу двигателя.

1.3 Постановка задачи

Цель данной выпускной квалификационной работы - на основе современной силовой элементной базы и цифровой техники разработать сервопривод на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами, реализующий режимы управления по моменту, скорости и положению. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- изучить системы управления бесколлекторными двигателями;
- выбрать оптимальный метод управления СДПМ;
- разработать ПО микроконтроллера для реализации выбранного метода;
- протестировать работу разработанной системы управления.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

2 Обзор современных методов управления СДПМ

Классификация методов управления СДПМ. Направленность развития принципов управления СДПМ в основном обуславливается развитием аппаратной базы привода: параметрами самого двигателя, типом преобразователя, наличием датчиков угла поворота и (или) скорости, вычислительной мощностью контроллера. Наличие/отсутствие датчиков магнитного состояния и координат механического движения (скорости, положения ротора) является принципиальным для построения системы управления СДПМ. По этому признаку методы управления СДПМ можно подразделить на управления с использованием ДПР и на управление без его использования, которое получило название «бездатчиковое управление». В классическом электроприводе на основе СДПМ на валу двигателя устанавливается ДПР. В качестве датчика могут применяться датчик Холла, энкодер, резольвер, редуктосин и др. Система управления в этом случае относительно проста, но усложняется конструкция двигателя, что снижает надёжность системы. Значительные успехи в области современной теории автоматического управления, в особенности развитие наблюдателей состояния, привели к появлению бездатчиковых электроприводов. В таких системах ДПР отсутствует, а необходимая информация для реализации алгоритма управления, поступает с наблюдателя состояния. Особенную роль бездатчиковые системы играют в тех электроприводных системах, где установка ДПР физически невозможна. Преимуществами бездатчиковых систем являются, дешевизна, компактность.

Методы построения самих систем управления для СДПМ также отличаются разнообразием. Различные способы управления СДПМ представлены на рисунке 2.1.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

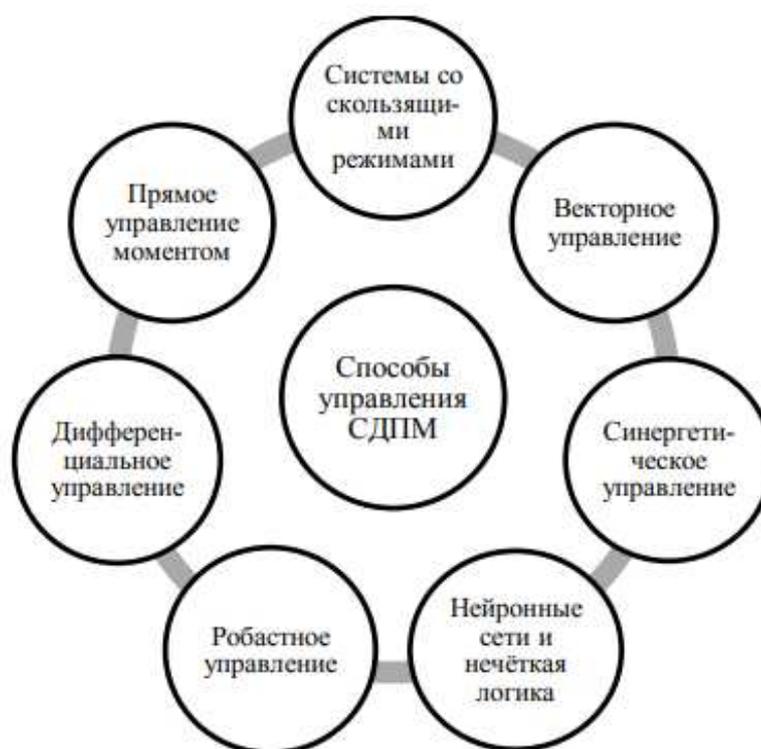


Рисунок 2.1 - Способы управления СДПМ

Рассмотрим каждый из способов управления СДПМ.

Метод прямого управления моментом (Direct Torque Control (DTC)) изначально был предложен для асинхронного двигателя, но в настоящий момент применяется и для других машин переменного тока. Основной принцип данного метода – выбор вектора напряжения по заранее заданной таблице значений. При этом осуществляется одновременное управление и моментом, и полем статора. Такие системы имеют ряд преимуществ: достигается робастность по отношению к изменению параметров, упрощается алгоритм управления за счет отсутствия контура регулирования тока, обеспечивается высокое быстродействие системы. Однако метод прямого управления моментом имеет существенный недостаток: при малых углах нагрузки возникают колебания скорости ротора и пульсации момента.

Метод дифференциального управления, описанный в [6], позволяет снизить пульсации момента. Он основан на рассмотрении знаков производных электромагнитного момента и модуля вектора потокосцепления статора. Недостатком метода является ухудшение характеристик при работе с максимальным напряжением.

Другим способом управления является применение систем со скользящими режимами (Sliding Mode Systems), которое применительно к СДПМ было описано С.Е. Рывкиным [7]. Такие системы имеют переменную структуру. Принцип управления состоит в том, что знак управляющего сигнала изменяется на противоположный при пересечении поверхности скольжения, которая описывается уравнением, составленным на основе переменных состояния объекта. Недостатками скользящего управления являются: возможность потери системой устойчивости в области достижения поверхности переключения; высокочастотные переключения, что влечет за собой быстрый износ механических и электрических частей электропривода; высокие требования к преобразователю.

Нейронные сети (Neuron Network) и нечёткая логика (Fuzzy Logic) являются современными и перспективными инструментами построения систем управления. При использовании данных методов отсутствуют ограничения на линейность системы, они эффективны в условиях шумов и после окончания обучения обеспечивают управление в реальном масштабе времени. Недостатком использования нейросетевых и нечётких регуляторов является необходимость в большой вычислительной мощности, а также сложность алгоритмов.

В последнее время получили развитие методы синтеза робастных систем управления (H_∞ -теория). Изменения момента нагрузки, активного сопротивления статора, момента инерции вращающихся частей, напряжения питания и характеристик окружающей среды влияют и на жесткость механических характеристик, и на качество переходных процессов. Робастные системы не являются адаптивными, но могут обеспечить необходимое качество работы при изменении характеристик воздействий и нестабильности параметров двигателя в широком диапазоне. Потребности в уменьшении необходимого объема информации о двигателе, стремление к универсальности систем управления и сокращению затрат на их наладку - всё

это вызывает интерес к робастному управлению. Но на данный момент, несмотря на серьезные теоретические достижения, методы H^∞ -оптимизации не получили обширного практического использования.

Существуют разработки систем управления СДПМ и на основе синергетического подхода. Из синергетической теории управления известно, что совокупность критериев управления системы выражаются в виде системы так называемых инвариантов. СДПМ как объект управления имеет два канала управления, поэтому для него можно задать не более двух инвариантов. В работе [8] в качестве технологического инварианта принимается стабилизация частоты вращения вала двигателя, а электромагнитный инвариант выбран таким образом, чтобы свести к нулю продольную составляющую тока статора i_d . Адекватное синергетическое управления синтезируется с помощью метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Достоинством данного метода является высокая точность, недостатком - сложность вычислений, значительное время обработки данных.

Принцип векторного управления СДПМ основан на ориентации вектора потокосцепления, создаваемого постоянными магнитами, поэтому в некоторых источниках его называют «полеориентированным» (Field-Oriented Control (FOC)). Цель данного метода состоит в том, чтобы управлять СДПМ, как отдельно возбужденной машиной постоянного тока, где потокосцепление и момент могут контролироваться отдельно в динамических и статических режимах работы двигателя. Мгновенные значения токов статора преобразовываются во вращающуюся систему координат (d,q) , связанную с ротором, с помощью математических уравнений и информации о положении ротора. При поддержании тока i_d равным нулю, потокосцепление по оси d будет постоянным. В этом случае электромагнитный момент будет пропорционален току i_q , который задаётся посредством системы управления. Также, чтобы добиться отдельного управления потокосцеплением и моментом необходимо устранить связь между двумя осями с помощью

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

вычитания из опорного напряжения по осям dq соответствующих связывающих членов, то есть выполнить компенсацию перекрёстных связей.

Самые распространённые методы для управления СДПМ - прямое управление моментом и векторное управление. Система с прямым управлением моментом лучше обрабатывает управляющие и возмущающие воздействия. Также векторное управление уступает прямому управлению моментом из-за низкой устойчивости к изменению параметров и требует использования более сложной системы ШИМ. Однако, векторное управление имеет преимущество в статических режимах: ниже затраты вычислительных ресурсов и меньше уровень пульсаций. Поэтому такие системы предпочтительны в электроприводах при малых возмущениях нагрузки и более стабильном управлении [9]. Идеальным вариантом был бы гибрид между векторным управлением и прямым управлением моментом, но реализация такого метода потребует серьезных временных затрат и высокой производительности УУ, таким образом остановимся на векторном управлении как самом широкоиспользуемом и универсальном.

2.1 Принципы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

Электродвигатели разных типов работают на основе одних общих физических законов электромагнетизма. Поэтому для выявления сложностей в управлении индукционным двигателем переменного тока (АС) сравним его как объект управления с двигателем постоянного тока (DC).

В машине постоянного тока поле возбуждения создаётся отдельной обмоткой и поэтому ток якоря (момент) и ток возбуждения (магнитный поток) могут быть управляемы независимо. Независимое управление магнитным потоком и моментом приводит к оптимальным значениям токовых характеристик (момент при нулевой скорости, быстрая реакция на изменение нагрузки и т.п.).

В машине переменного тока токи статорных обмоток создают магнитный поток и момент вращения, поэтому сложно управлять моментом и

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

магнитным потоком независимо. Управление только величиной тока не позволяет обеспечить независимое регулирование. Поэтому, во-первых, должны быть управляемы величина и фаза, то есть вектор тока.

В типичном индукционном АС двигателе 3 знакопеременных тока, электрически сдвинутые на 120° , питают 3 стационарных обмотки статора. Результирующий поток статора индуцирует знакопеременные токи в проводящих стержнях "беличьей клетки" ротора, которые создают свои собственные поля, статорные и роторные поля взаимодействуют, создавая момент.

В отличие от DC машины ток ротора АС машины не может быть управляем напрямую от внешнего источника, а является производным от вращающегося статорного поля и есть результат от токов, индуцированных в проводниках ротора.

Векторное управление в АС индукционных машинах аналогично управлению DC двигателем с независимым возбуждением. В DC двигателе (рисунок 2.2) поток поля Φ_f производимый током I_f расположен перпендикулярно потоку Φ_a , создаваемому током якоря I_a . Эти поля разделены и стационарны относительно друг друга. Поэтому, когда ток якоря регулируется для управления моментом, а магнитный поток остаётся неизменным, то получается хорошая динамика в управлении двигателем.

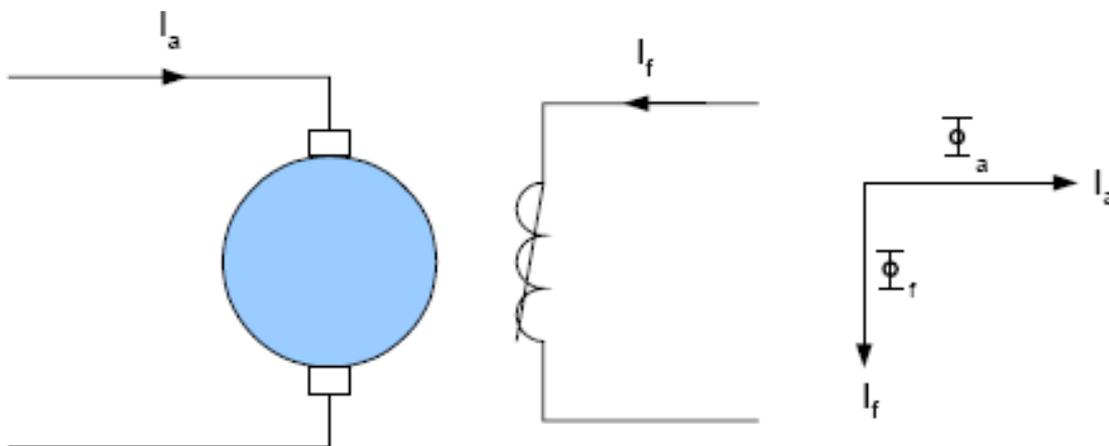


Рисунок 2.2 - Двигатель постоянного тока и вектора его потоков

Векторное управление стремится воссоздать эти ортогональные компоненты в АС машине, чтобы управлять моментом, производимым током независимо от магнитного потока, производимого током, и, таким образом, достичь управляемости характерной для DC машины.

Возможно представление 3-фазной машины в виде эквивалентной 2-фазной машины, в которой применяются оси прямая (d - direct) и квадратурная (q - quadrature), причём как для статора, так и для ротора.

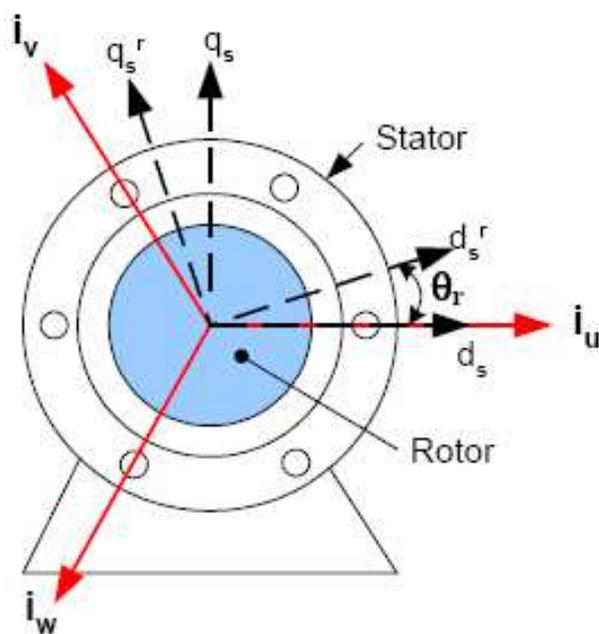


Рисунок 2.3 - d-q представление АС двигателя

Рисунок 2.3 показывает d-q представление АС двигателя. Оси d_s - q_s являются прямой и квадратурной осями стационарной координатной системы статора, а d_s^r - q_s^r являются аналогичными осями ротора, известными как вращающаяся система координат.

При векторе i_u размещённом на оси d_s можно показать, что векторная сумма 3-х статорных токов i_u , i_v и i_w может быть выражена посредством квадратурных компонент d_s и q_s (в некоторых источниках эти оси именуется α и β) в статорной системе координат:

$$\begin{cases} i_{ds} = i_u, \\ i_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_v - i_w) \end{cases} \quad (1)$$

Известно, что в 3-фазной сбалансированной системе (с изолированной нейтралью)

$$i_u + i_v + i_w = 0,$$

тогда (1) станет

$$\begin{cases} i_{ds} = i_u, \\ i_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_u + \frac{2}{\sqrt{3}} i_v. \end{cases} \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой преобразование (трансформацию) 3-фазных статорных токов в двухфазную ортогональную векторную форму с координатами d_s и q_s . Математическое преобразование для данного процесса известно, как преобразование Кларк. Чтобы произвести эту трансформацию нам необходимо измерять токи только в двух фазах, например, как в нашем случае это - i_u и i_v .

Дальнейшее преобразование необходимо, чтобы компоненты системы координат неподвижного статора сопоставить вращающейся системе координат ротора. Это достигается применением преобразования Парка следующим образом:

$$(3) \quad \begin{cases} i_{ds}^r = i_{qs} \sin \theta_r + i_{ds} \cos \theta_r, \\ i_{qs}^r = i_{qs} \cos \theta_r - i_{ds} \sin \theta_r. \end{cases}$$

где θ_r представляет собой угловое положение поля ротора.

Трансформация Парка даёт нам компоненты роторного тока (i_{ds}^r и i_{qs}^r) прямой и квадратурной осей в синхронно с ротором вращающейся системе координат, которая вращается с угловой скоростью ω и имеет угловой сдвиг θ_r ($\theta_r = \omega t$) относительно осей d_s - q_s . Следовательно, в статическом режиме эти координаты во вращающейся системе координат, получаются неизменны во времени.

Снова возвращаясь к DC машине, представленной на рисунке 2.2, i_{ds}^r аналогичен току возбуждения I_f (компонента потока), а i_{qs}^r аналогичен току якоря I_a (компонента момента).

Поскольку i_{ds}^r сонаправлен с вектором потока ротора, а i_{qs}^r смещён на 90 градусов относительно i_{ds}^r , постольку поток и ток могут быть регулируемыми независимо друг от друга

2.2 Векторное управление асинхронным двигателем

Было доказано, что для обеспечения хорошей динамики в управлении индукционной машиной должны быть регулируемыми токи i_d и i_q вращающейся системы координат. Посредством системы управления с замкнутым контуром, заданные значения i_d и i_q сравниваются с текущими величинами, измеренными в силовой цепи двигателя.

Чтобы получить текущие величины двигателя, необходимо выполнять преобразование токов 3 фаз статора в прямую и квадратурную компоненты вращающейся системы координат. Результат сравнения (ошибка от задания) далее обратно преобразуется в трёхфазные значения и подаётся на двигатель.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

На рисунке 2.4 показан этот процесс.

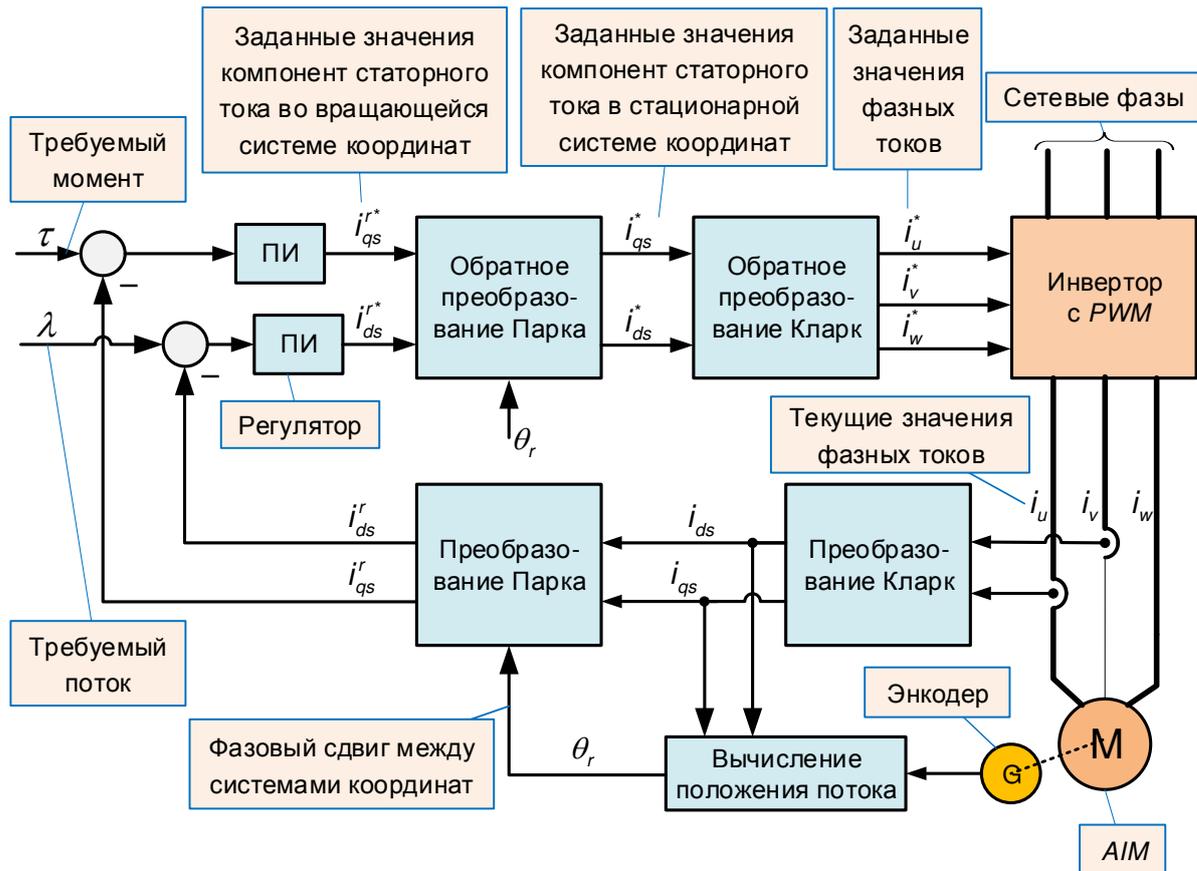


Рисунок 2.4 - Система векторного управления для асинхронного двигателя

Назначение блока вычисления положения потока, показанного на рисунке 2.4 в том, чтобы сделать коррекцию ориентации поля и обеспечить сонаправленность компоненты i_d с потоком ротора. В системах с АИМ (асинхронные двигатели) угловое положение потока ротора измеряется прямым образом с помощью датчика, встроенного в двигатель, или определяется (менее точно) косвенным образом. Косвенный метод основан на вычислении угла смещения между полями статора и ротора с применением известных характеристик ротора совместно с определяемым физическим положением ротора. Физическое положение ротора измеряется, как правило, применением инкрементного энкодера, зафиксированного на валу двигателя.

Разницы (ошибки) между заданными и текущими значениями компонент и подаются на входы пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов. Обратите внимание, что ПИ-регуляторы не являются

неотъемлемой частью системы векторного управления, но они обычно применяются в системах такого типа, чтобы получить замкнутый контур управления двигателем. Выходное значение ПИ-регулятора, которое получилось для вращающейся системы координат, преобразуется обратно в неподвижную систему координат с помощью инверсной трансформации выражения (3), а затем преобразуется из неподвижной системы координат в 3-фазные компоненты с помощью инверсной трансформации выражения (2). Инверсные преобразования Кларк и Парка показаны в выражениях (4) и (5) соответственно.

$$\begin{cases} i_u = i_{ds}, \\ i_w = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} - \frac{1}{2} i_{ds}, \\ i_v = -i_u - i_w, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_{ds} = i_{ds}^r \cos\theta_r - i_{qs}^r \sin\theta_r, \\ i_{qs} = i_{ds}^r \sin\theta_r + i_{qs}^r \cos\theta_r. \end{cases} \quad (5)$$

2.3 Векторное управление синхронным двигателем

Система векторного управления, подробно описанная в [2], представленная на рисунке 2.4 и рассчитанная для асинхронного двигателя, может быть легко адаптирована для управления и синхронным двигателем (СДПМ). В СДПМ компонента потока формируется постоянным магнитом (неподвижная обмотка возбуждения, заменена на вращающийся постоянный магнит). Поток ротора, формируемый постоянным магнитом, вращается с той же скоростью что и поле статора, то есть скольжение отсутствует.

Поэтому для СДПМ задание компоненты i_d (λ) установлено в ноль, а роторный угол считывается с датчика положения ротора. Конфигурация системы векторного управления для СДПМ показана на рисунке 2.5.

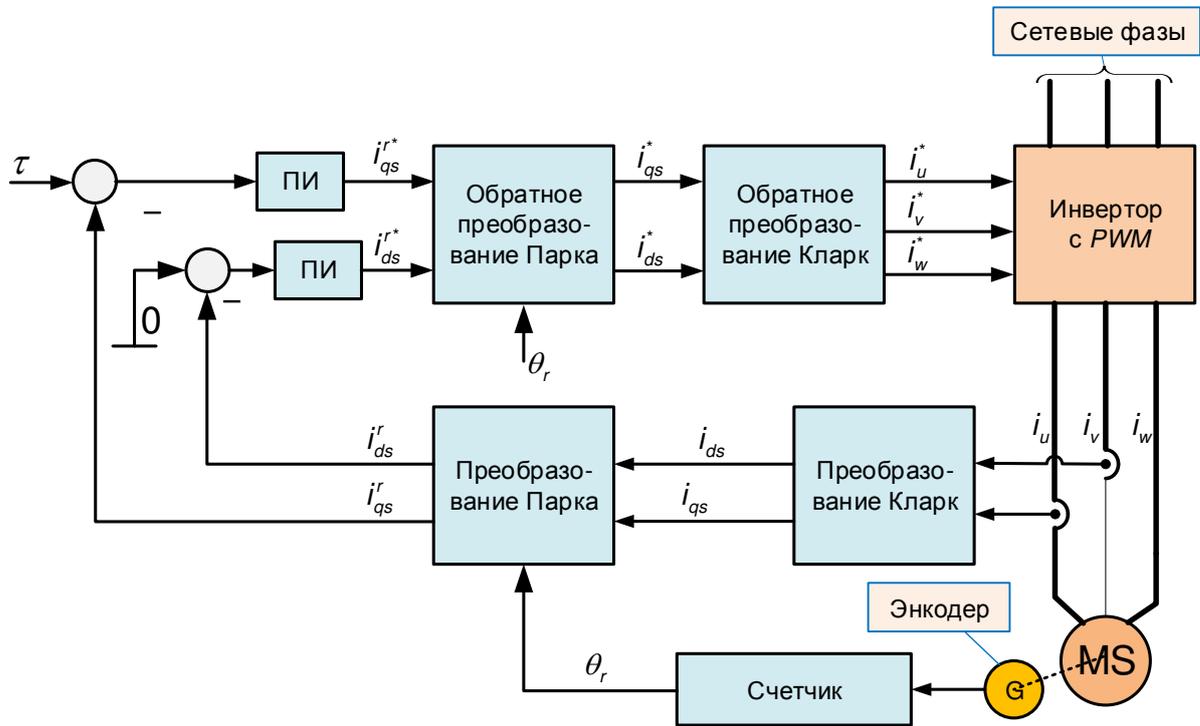


Рисунок 2.5 - Система векторного управления для синхронного двигателя

3 Разработка системы управления

Схема, изображенная на рисунке 2.5, будет использоваться, как основная схема управления сервоприводом. Подробно рассмотрим элементы схемы, изображенной на рисунке 3.1:

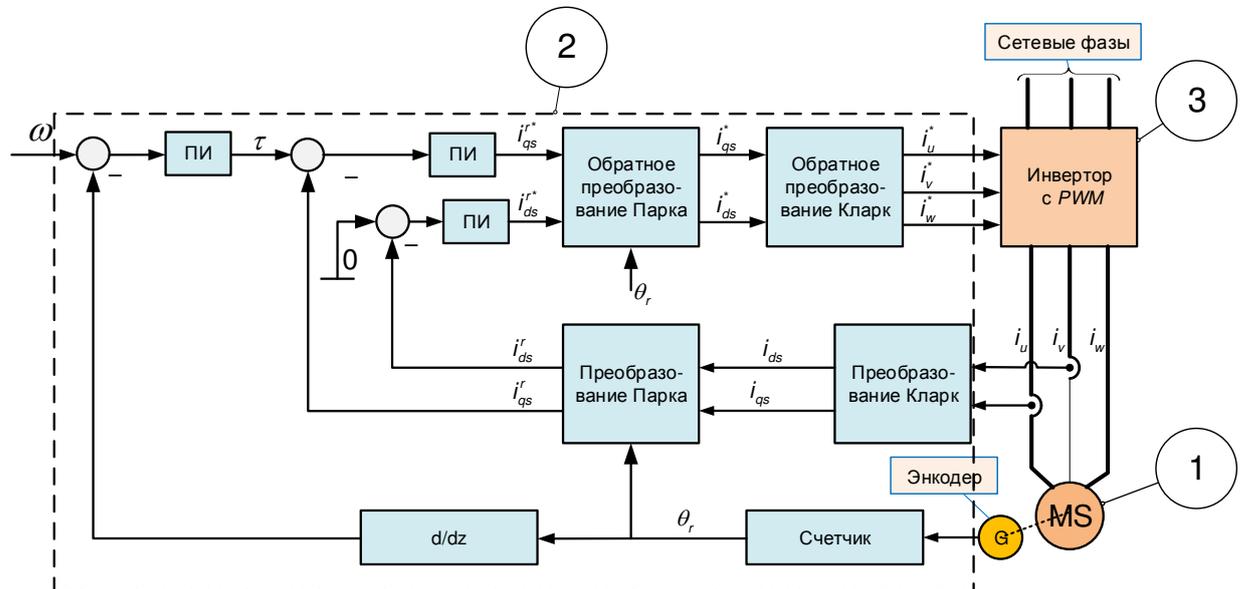


Рисунок 3.1 - Система векторного управления для синхронного двигателя

Здесь 1 – двигатель, 2 – управляющее устройство, 3 – силовая плата.

3.1 Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Двигатель в схеме обозначен цифрой 1. Его название и характеристики:
Название двигателя - Baldor brushless ac servomotor BSM50A-233AEA.



Рисунок 3.2 - Baldor brushless ac servomotor BSM50A-233AEA

В таблице 2 приведены характеристики данного электродвигателя.

Таблица 2 - Характеристики BSM50A-233AEA

Параметр	Значение	Единицы измерения
Предельный вращающий момент	0.91	Н*М
Номинальный ток на обмотках	2.87	А
Номинальная скорость	4000	Об/мин
Номинальное напряжение	160	В
Пиковый ток	9.6	А
Нагревостойкость изоляции	F	

Двигатель имеет энкодер, после преобразований его сигнала мы будем получать значение ω_r и угол поворота.

3.2 Силовая плата с модулем PM30CSJ060

Модуль умного питания, предназначенный для коммутации силовых цепей, работающих на частотах до 20кГц. Встроенные схемы обеспечивают оптимальное управление двигателем и защищает от короткого замыкания, перегрева, высоких токов (рисунок 3.1).

Силовая плата выполняет функции *инвертора с PWM* и управляется сигналами i_u , i_v , i_w . Так же она имеет два *датчика тока* откуда мы используем данные i_u , i_v . На рисунке 3.1 она обозначена цифрой 3.

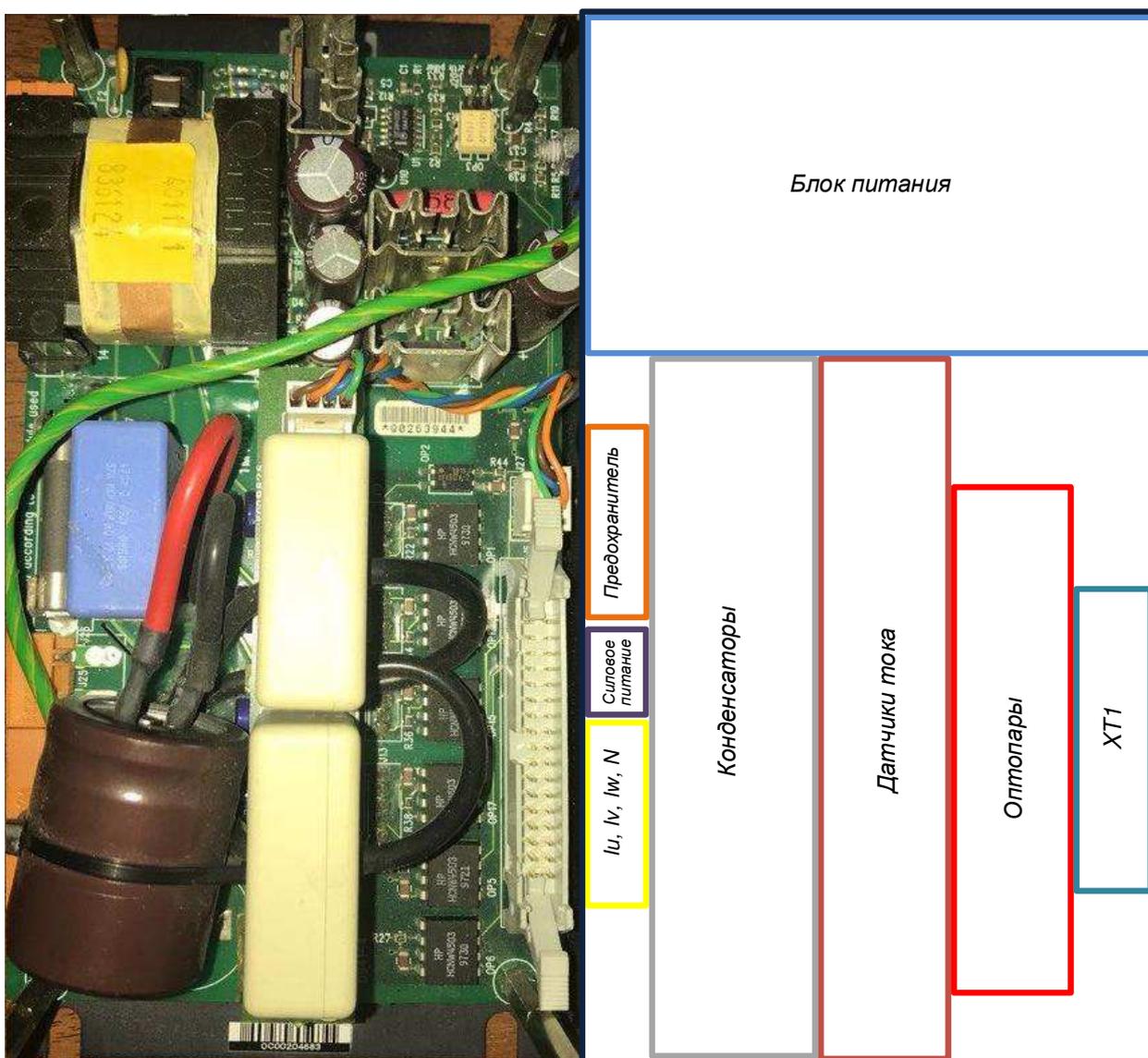


Рисунок 3.3 - Силовая плата и ее структурная схема (вид сверху)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таблица 3 - Технические характеристики АТХМЕГА128А4U

Название	Значение	Единицы измерения
Flash память	128+8	Кбайт
EEPROM	2	Кбайт
SRAM	8	Кбайт
Частота	32	МГц
Температура работы	0 - 105	°С

Плата будет выполнять функции регулятора, преобразователей, обратных преобразователей, а также генерировать фазовые токи i_u , i_v , i_w . Плата будет заменять целый блок элементов схемы, на рисунке 3.1 он обозначен цифрой 2.

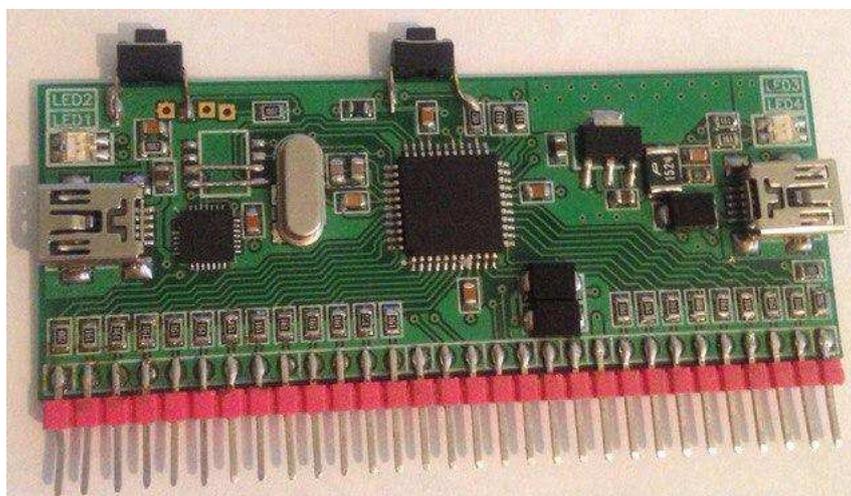


Рисунок 3.5 - Плата с микроконтроллером АТХМЕГА128А4U

3.4 Датчики тока

Возвращаясь к рисунку 3.1, в первую очередь нам необходимо знать значение токов с двух фаз i_u и i_v . Силовая плата имеет два датчика тока, что позволяет нам их получать. АЦП микроконтроллера работает до напряжения 1.25 Вольт, поэтому сигнал с датчика тока будет проходить через делитель напряжения, затем уже на пины 6,7 порта А.

Режим работы АЦП выбираем знаковый, чтобы получать значения от -2048 до 2047, как на рисунке 3.6.

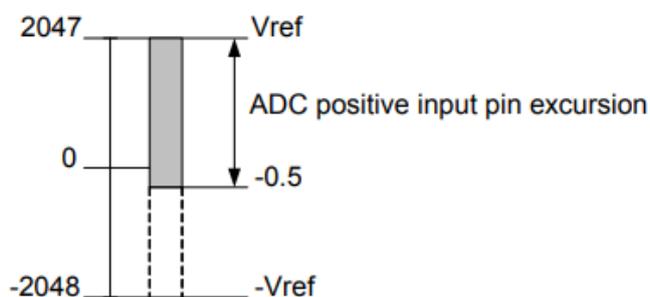


Рисунок 3.6 – Знаковый режим АЦП

Посчитаем значение тока на один бит. Напряжение на 1.25/2 вольт приходит через резистор 270 Ом. Соответственно,

$$I_{2047} = \frac{U_{2047}}{R} = \frac{0.625}{270} = 2.315 \text{ мА.} \quad (6)$$

Максимальное значение тока 2.315 мА.

$$I_{\frac{1}{2047}} = \frac{I_{2047}}{2047} = \frac{2.315}{2047} \approx 1.1 \text{ мкА.} \quad (7)$$

Для расчетов в микроконтроллере, будем использовать значение 1.1 мкА на один бит.

вращения, благодаря чему микроконтроллер сможет определить направление вращения.

Энкодер подключаем на порт Б на пины 1,2 и метку Z на пин 3. Настроив счетчик импульсов на микроконтроллере и реализовав вывод полученных значений через UART, построим в реальном времени график в Matlab с помощью кода в Приложении Б.

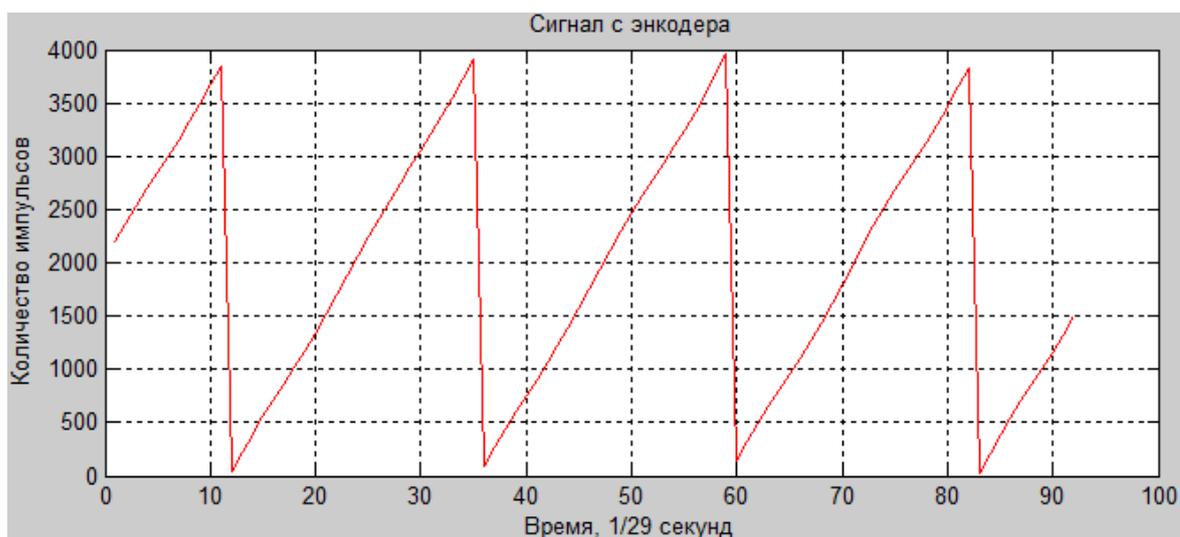


Рисунок 3.8 – Значения энкодера в реальном времени

На рисунке 3.8 можно увидеть каким образом формируется сигнал с энкодера в микроконтроллере при вращении вала ротора.

3.6 Программирование преобразований Парка и Кларк

После того, как реализовано получение сигналов с датчиков тока и датчиков положения ротора можно реализовывать блоки преобразований, т.е. формулы (2), (3). В Приложении В эти функции называются `bfr` и `bkr_2` соответственно и находятся в файле «Conversion.asm».

Реализовав вывод полученных значений через UART, построим в реальном времени графики в Matlab с помощью кода в Приложении Б.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Первый блок преобразований b_{fr} , на вход функции подаются сглаженные сигналы с датчиков токов (верхний график рисунок 3.9), выходные сигналы I_{ds} и I_{qs} (нижний график рисунок 3.9).

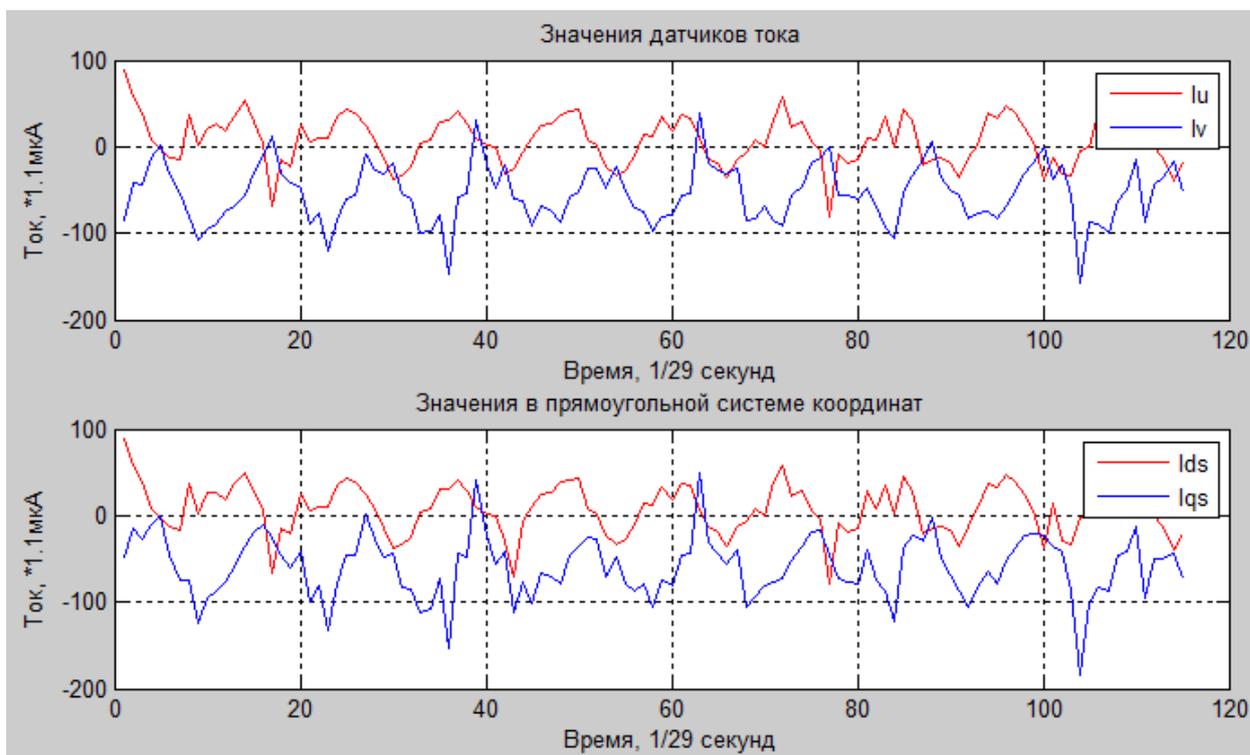


Рисунок 3.9 – Результаты преобразований в реальном времени

Второй блок преобразований bkr_2 , на вход функции подаются сглаженный сигналы I_{ds} и I_{qs} (верхний график рисунок 3.10), выходные сигналы i_{ds}^r и i_{qs}^r (нижний график рисунок 3.10).

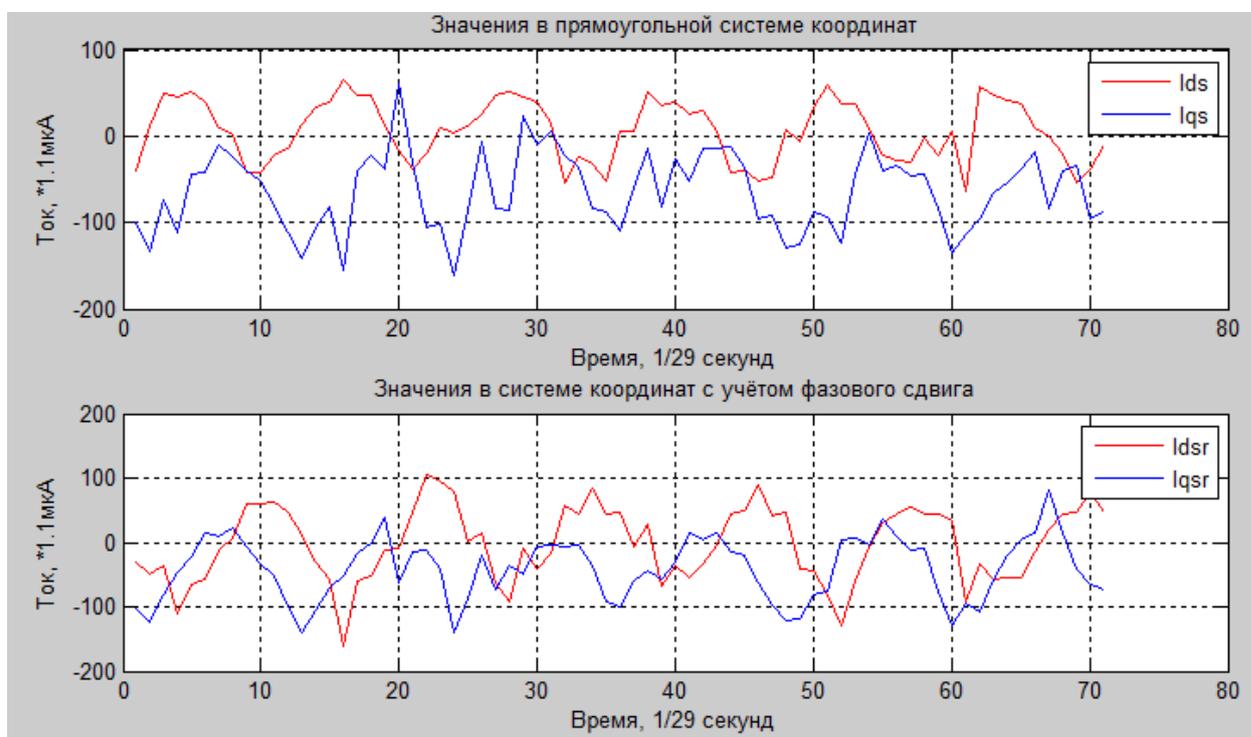


Рисунок 3.10 – Значения компоненты момента и компоненты потока в реальном времени

Выходными значениями являются значения i_{ds}^r (компонента потока) и i_{qs}^r (компонента момента). Данные параметры являются регулируемые с помощью ПИ-регуляторов.

Следующий этап, это расчет скорость скорости. Зная частоту работы микропроцессора 29.4912 МГц, будем каждую миллисекунду считать изменение значения энкодера. Т.е. каждые 29291 импульса кварцевого генератора будем фиксировать изменение значения энкодера. Таким образом, скорость будет выражена, приближенно, в количестве импульсов энкодера в миллисекунду.

Появляется возможность реализовать контур управления по скорости, как на рисунке 3.11.

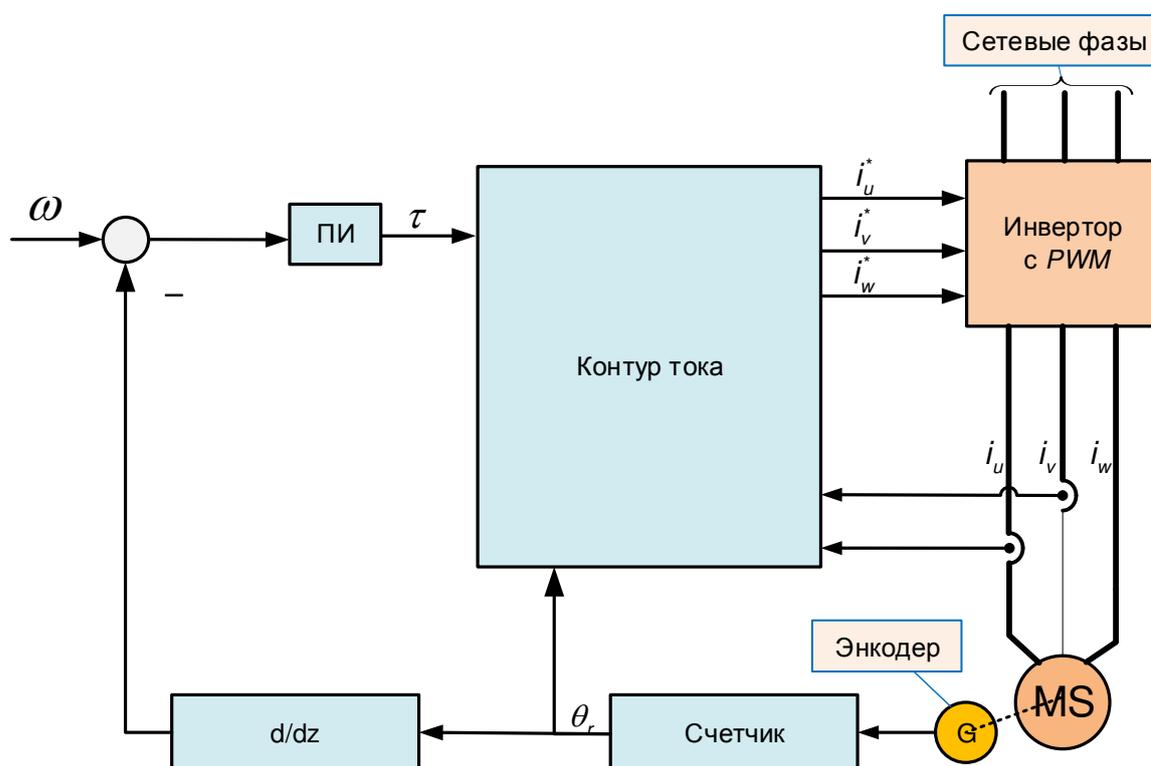


Рисунок 3.11 – Система векторного управления СДПМ с контуром скорости

Следовательно, мы считаем ошибку по скорости и подаем ее на ПИ-регулятор, затем считаем ошибку по компоненте момента и компоненте потока (желаемая ошибка равна 0). Ошибки подаём на ПИ-регуляторы и используя формулы (5), (4) получаем управляемые двигателем токи i_u , i_v и i_w . В Приложении В эти функции называются bkr_1 и $bfp2$ соответственно и находятся в файле «Conversion.asm».

Итак, задаем желаемую скорость в файле «chisla.asm», она учитывается в расчете ошибки по скорости, затем ошибка обрабатывается ПИ-регулятором, тем самым мы получаем задание по моменту. Относительно этого значения, вычисляется ошибка по моменту, так же подаётся на регулятор и получаем I_{qzad} и I_{dzad} .

Верхний график на рисунке 3.12 это значения после преобразований i_{ds}^r и i_{qs}^r , а нижний график на рисунке 3.12 это I_{qzad} и I_{dzad} .

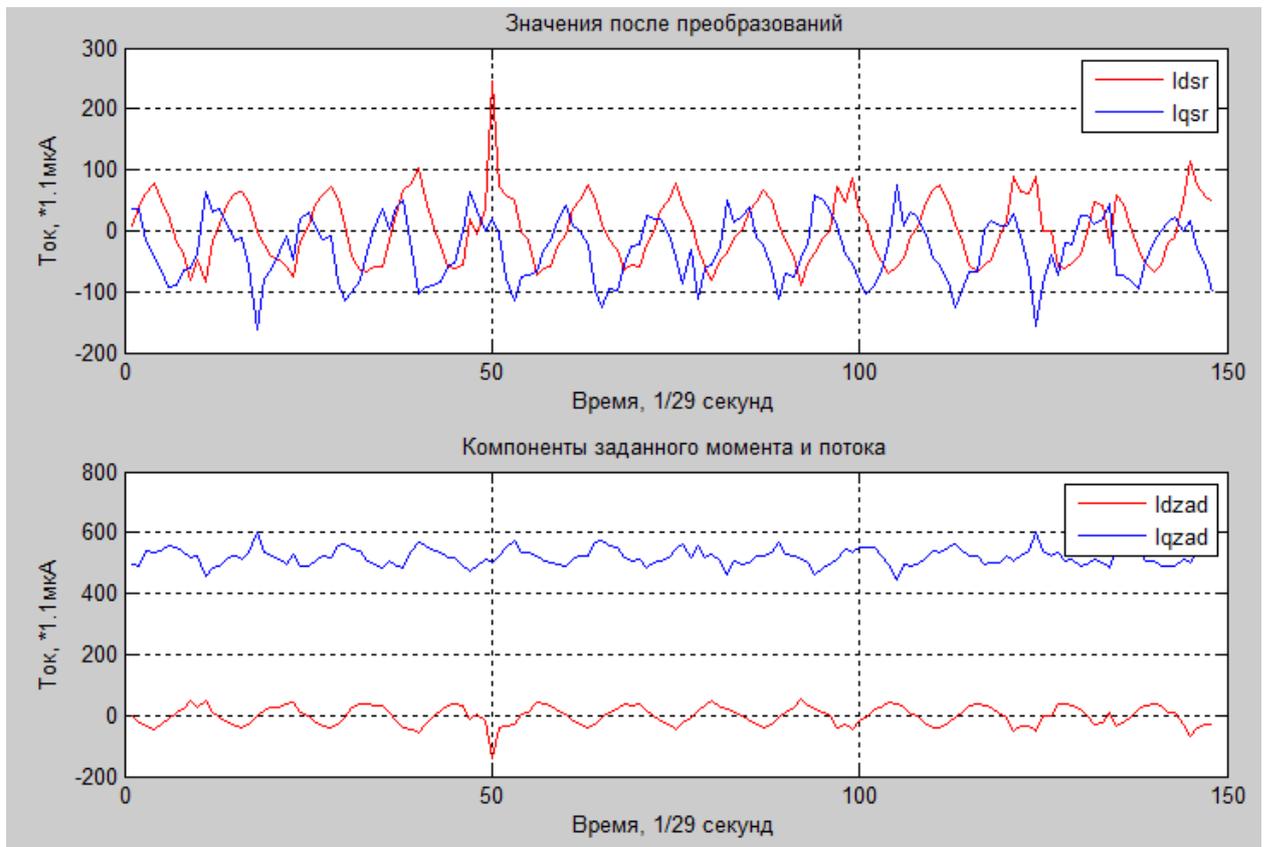


Рисунок 3.12 – Результаты преобразований в реальном времени

Выходными значениями являются желаемые значения i_{ds}^r (компонента потока) и i_{qs}^r (компонента момента).

Третий блок преобразований bkr_1 , на вход функции подаются значения I_{qzad} и I_{dzad} (верхний график рисунок 3.13), выходные значения I_{ds}' и I_{qs}' (нижний график рисунок 3.13).

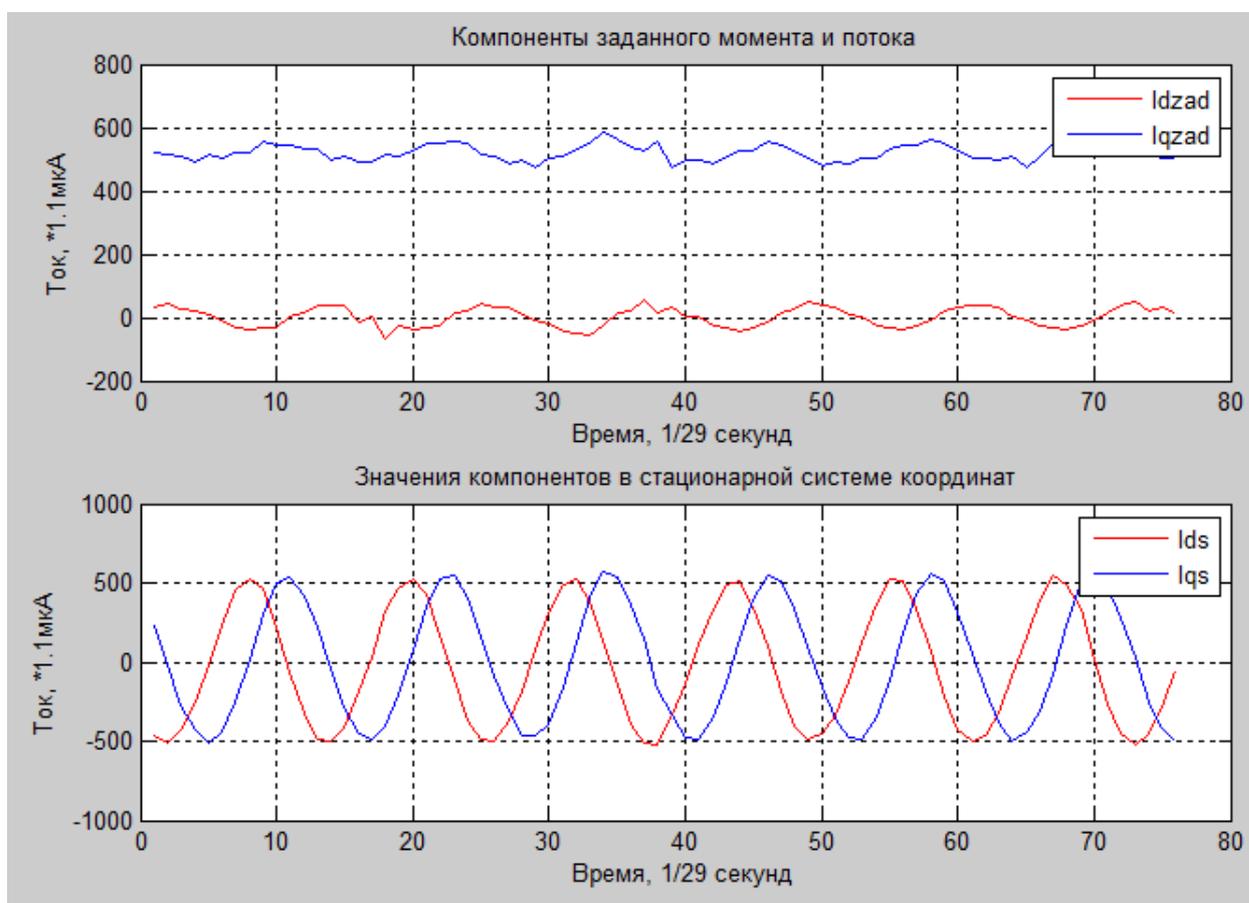


Рисунок 3.13 – Результаты преобразований в реальном времени

Выполнен переход к вращающейся системе координат.

Четвертый блок преобразований *bfr2*, на вход функции подаются значения I_{ds}' и I_{qs}' (верхний график рисунок 3.14), выходные значения i_u , i_v и i_w (нижний график рисунок 3.14).

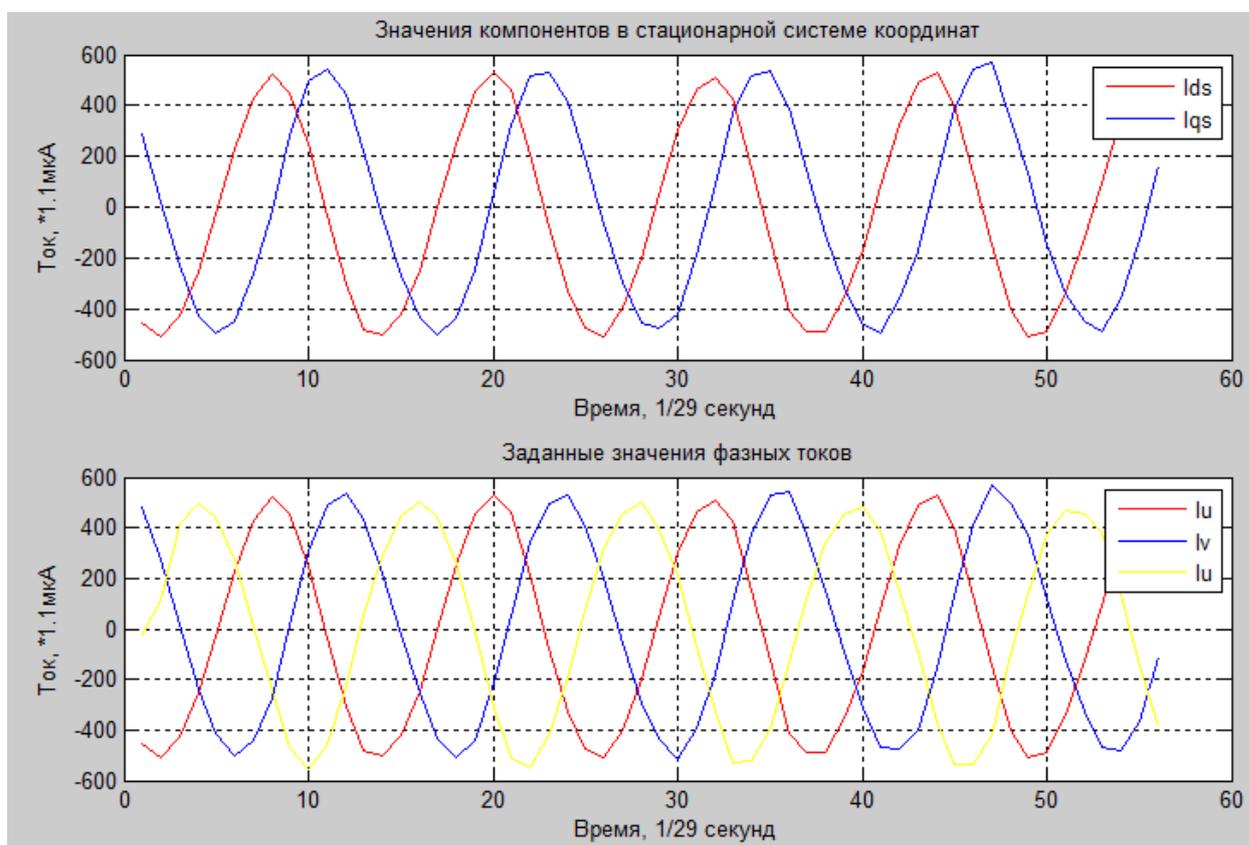


Рисунок 3.14 – Результаты преобразований в реальном времени

Полученные значения подаются с помощью ШИМ-генерации на электронный коммутатор.

3.7 Описание программы

Листинг программы управления СДПМ написанной для микроконтроллера находится в приложении В.

Файл «*chisla.asm*» - в этом файле находятся настройки ПИ-регуляторов и задание скорости.

Файл «*Conversion.asm*» - в этом файле находятся прямое и инверсное преобразования Кларк, прямое и инверсное преобразования Парка, процедура умножения чисел и деление на 1024.

Файл «*filtradc.asm*» - в этом файле осуществляется обработка сигнала с датчиков тока посредством АЦП, и последующий вызов преобразований из файла «*Conversion.asm*».

Файл «*init_Timers.asm*» - этот файл содержит настройку всех таймеров и счетчиков.

Файл «*initadc.asm*» - этот файл содержит настройку АЦП

Файл «*UARTE0.asm*» - в этом файле находятся функции байтовой передачи файлов по UART.

Файл «*mainmain.asm*» - самый главный файл, который связывает все другие файлы, настраивает пины на прием сигналов или их генерацию. Также в этом файле происходит отправка значений скорости по UART.

В таблице 4 приведены все функции, прерывания и их описание.

Таблица 4 – Описание функций и прерываний

Наименование функции или прерывания	Описание
Функции	
adc_init	Инициализация АЦП контроллера
bfp	Выполнение преобразований Кларк
bfp2	Выполнение обратных преобразований Кларк
bkp1	Выполнение преобразований Парка
bkp2	Выполнение обратных преобразований Парка
checkZ	Операции по настройке фазового сдвига
chisla	Задание коэффициентов регуляторов и начальных значений
div32bit_to_1024	Деление 4 байтного числа на 1024
fmuls16x16_32	Знаковое умножение 2 байтных чисел
loop	Цикл ожидания прерываний
PID_reg	ПИ-регулятор
putty_vivod	Вывод необходимых значение по UART
qqqq	Вычисление скорости вала в настоящий момент
START	Функция вызова всех инициализаций таймеров
start0	Считывание значения тока с 0 канала АЦП

Окончание таблицы 4.

Наименование функции или прерывания	Описание
Start1	Считывание значения тока с 1 канала АЦП
TCC0_init	Инициализация таймера, который генерирует ШИМ-сигналы на электронный коммутатор
TCD1_init	Инициализация таймера для вывода значений в UART
TCD0_init	Инициализация таймера для расчета скорости
TCD1_init	Инициализация счетчика для счета импульсов энкодера
TCE0_init	Инициализация таймера для отправки значений по UART
UARTE0_init	Инициализация интерфейса UART
Zinit	Инициализация счетчика для обнаружения метки Z энкодера
Прерывания	
UARTE0_RX	Прерывание по принятию данных по интерфейсу UART
TCE0_OVF_VECT	Прерывание для вывода данных контура скорости и контура тока в интерфейс UART
ADCA_CH0_vect	Прерывание по завершению преобразований в АЦП на канале 0
ADCA_CH1_vect	Прерывание по завершению преобразований в АЦП на канале 1
TCD0_OVF_VECT	Прерывание по переполнению таймера для расчета скорости
TCD1_OVF_VECT	Прерывание по прохождению нуля энкодером, для фиксирования это перехода.
PORTB_INT0_VECT	Прерывание по сигналу с метки Z энкодера

3.8 Результаты разработки

Заданная скорость 5 импульсов энкодера в миллисекунду. В программе реализован вывод значения угла с энкодера, скорости и ошибки по скорости. Результат работы на рисунке 3.15 получен при следующих заданных значениях ПИ-регуляторов:

Для контура Iq пропорциональный коэффициент равен 0.586, интегральный коэффициент равен 0. Для контура Id пропорциональный

коэффициент равен 0.586, интегральный коэффициент равен 0. Для контура скорости пропорциональный коэффициент равен 8, интегральный коэффициент равен 0.78.

Построим в реальном времени график в Matlab с помощью кода в Приложении Б. На рисунке 3.15 результат работы контура скорости.

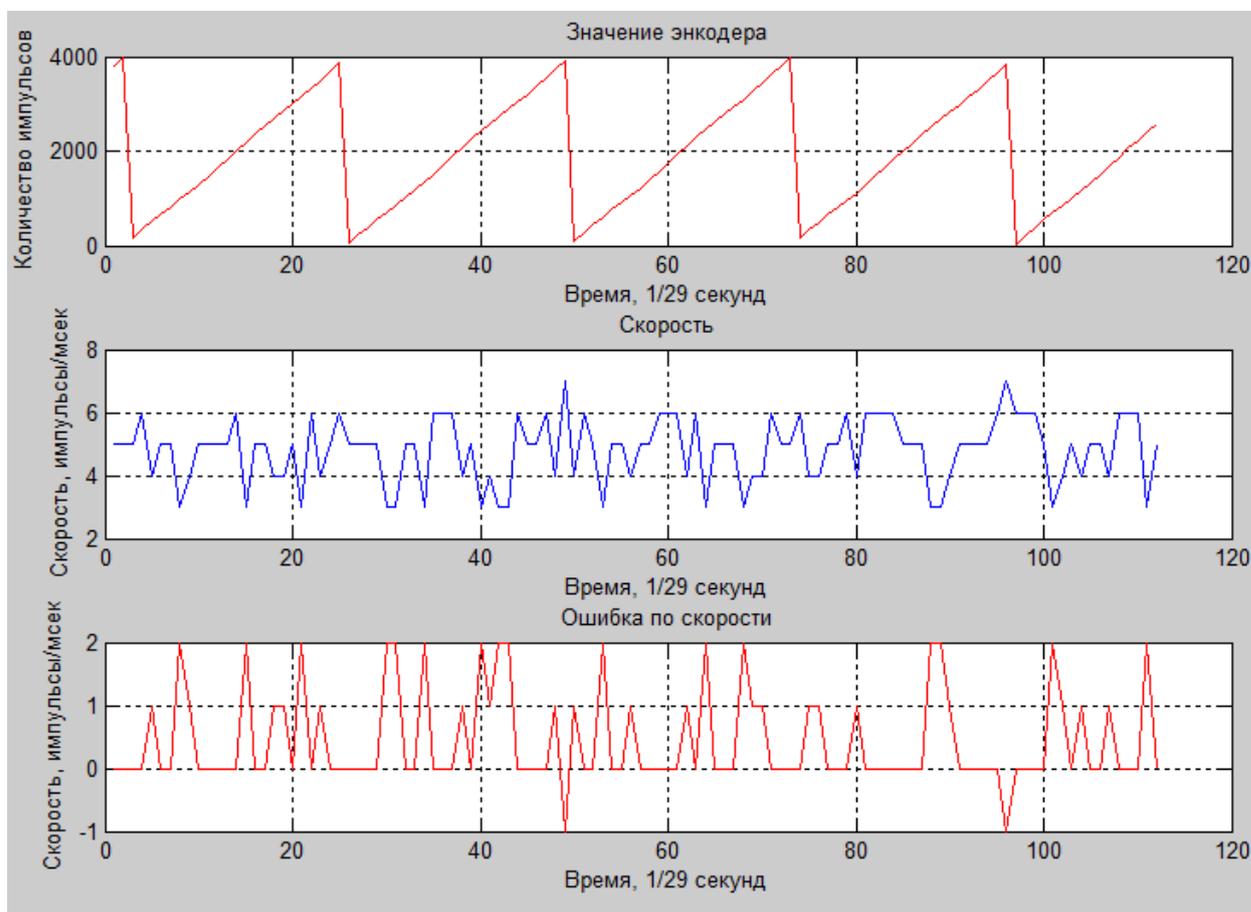


Рисунок 3.15 – Результат работы системы управления

Вывод по результатам: на рисунке 3.15 на втором графике видно, что контур скорости работает, и система пытается удерживать скорость 5 импульсов энкодера в миллисекунду. На третьем графике изображена ошибка по скорости, которая стремится к нулю в процессе вращения ротора.

4 Безопасность жизнедеятельности

Разрабатываемый сервопривод может представлять опасность людям, которые с ним работают. В связи с использованием в платах электрического тока и наличием СДПМ будет рассмотрена электрическая и механическая безопасность.

Рассмотрим систему с точки зрения электробезопасности. В системе есть блок питания, преобразующий переменный ток 220 Вольт в постоянный ток напряжением до 27 В. Значение постоянного тока регулируется двумя тумблерами. Корпус преобразователя изготовлен из металла, поэтому имеет смысл рассмотреть пробой на корпус. Пробой на корпус - это соединение металлического прибора с линейным проводом, при этом корпус станет находиться под фазовым напряжением 220 В. Случись такая ситуация, лицо, использующее этот прибор, может получить травму. Рассчитаем величину тока проходящего по телу человека коснувшегося корпуса преобразователя с пробоем. Получить значение тока можно по формуле (6)

$$I_h = \frac{U}{R_h}, \quad (8)$$

где I_h – ток, протекающий по телу человека, U – напряжение касания, R_h – электрическое сопротивление человека.

Кожа имеет наибольшее удельное сопротивление, поэтому сопротивление человека определяется главным образом от кожи. Таким образом, чем толще слой кожи, тем больше сопротивление. Влажный слой кожи имеет меньшее сопротивление. Также влияет на величину сопротивления психическое состояние человека, факторы внешней среды – давление, температура, плотность. Возраст человека тоже оказывает влияние – у детей меньше чем у стариков. Путь протекания тока (от одной руки к другой, от руки к ноге) также является фактором, влияющим на значение сопротивления. Подытоживая сопротивление человека нестабильно, нелинейно, определяется множеством факторов, для упрощения обычно расчетное значение принимают 1 кОм.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Подставляя значения в формулу (4.1), получаем значение тока протекающего по телу человека.

$$I_h = \frac{U}{R_h} = \frac{220}{1000} = 220 \text{ мА.} \quad (9)$$

Для определения степени опасности для здоровья от тока такой величины следует обратиться к рисунку 4.1, на котором изображена таблица определяющие последствия протекания тока от величины его.

Ток, проходящий через человека	Характер воздействия	
	Переменный ток 50-60 Гц	Постоянный ток
0,5-1,5 мА	Начало ощущения, лёгкое дрожание пальцев рук	Не ощущается
2,0-3,0 мА	Сильное дрожание пальцев рук	Не ощущается
5,0-7,0 мА	Судороги в руках	Зуд, ощущение нагрева
8,0-10,0 мА	Руки трудно, но ещё можно оторвать от электродов. Сильные боли в пальцах, кистях рук и предплечьях	Усиление нагрева
20-25 мА	Паралич рук, оторвать их от электродов невозможно. Очень сильные боли. Дыхание затруднено.	Ещё большее усиление нагрева. Незначительное сокращение мышц рук.
50-80 мА	Паралич дыхания. Начало фибрилляции сердца.	Сильное ощущение нагрева. Сокращение мышц рук. Судороги, затруднение дыхания.
90-100 мА	Паралич дыхания. При длительности 3 с и более - паралич сердца.	Паралич дыхания

Рисунок 4.1 – Таблица зависимости степени поражения человека от величины, и характера электрического тока

Таким образом, пробой на корпус смертельно опасен для человека. Для предотвращения подобного на блоке питания организовано зануление. В блоке питания используется трехконтактная вилка, изображенная на рисунке 4.2.

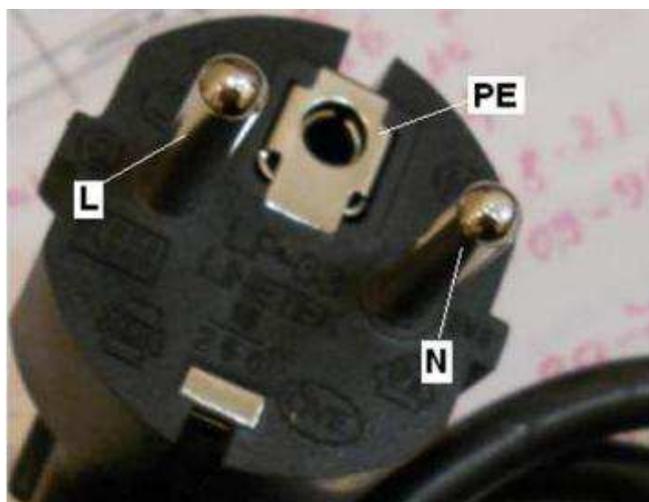


Рисунок 4.2 - Изображение вилки блока питания

Вилка вставляется в розетку, где происходит контакт трех проводов: L – фазный, N – нулевой рабочий, PE – защитное. Защитный провод PE соединяет корпус устройства с нулевым рабочим проводником, и в случае пробоя на фазы на корпус происходит короткое замыкание фазы с нулем. Как следствие резкое повышение тока в цепи, что приводит к немедленному срабатыванию автоматов защиты. При срабатывании автоматов, отключается неисправный прибор и человек, прикасающийся к корпусу, оказывается в безопасности. Номинальное напряжение двигателя 27 Вольт рассчитаем ток, протекающий по телу человеку при касании им оголенных контактов двигателя. Воспользовавшись формулой (4.1), получим

$$I_h = \frac{U}{R_h} = \frac{27}{1000} = 27\text{мА}. \quad (10)$$

По формуле (4.3) получено 27 мА, что в соответствии с рисунком 4.1 такой ток может представлять опасность для здоровья человека. Мерами для предотвращения поражения током человека, работающего с сервоприводом, является изоляция токопроводящих контактов.

На силовой плате максимальное напряжение аналогового и цифрового выхода/входа 15 В. Воспользовавшись формулой (4.1) для расчета значения тока, проходящего по человеку, получено

$$I_h = \frac{U}{R_h} = \frac{15}{1000} = 15\text{мА}. \quad (11)$$

10мА не представляют какой-либо опасности для человека, только возникновение легкого чувства нагрева кожи. Исходя из этого, можно сделать вывод о безопасности для человека использования питания логической части системы 5-ю вольтами.

Рассмотрим обеспечивается ли в разрабатываемом сервоприводе механическая безопасность. Опасность может представлять вал двигателя, вращающийся на большой скорости, на него может намотаться провода, одежда или волосы. Для ограничения доступа к двигателю, он надежно закреплен в стальную рамку четырьмя болтами. Рамка же прикреплена к стойке, которая обеспечивает устойчивость и законченность конструкции. Но для полного исключения возможности пострадать от вращающихся частей двигателя, следует надеть чехол на вал.

Вывод по разделу: разрабатываемый сервопривод потенциально может представлять угрозу поражения электрическим током, но использование зануления и обеспечение изоляции проводящих контактов сводит вероятность поражения к нулю. Также при написании этого раздела было выявлена необходимость прикрепления кожуха к валу двигателя для устранения механической опасности, в случае больших скоростей. При соблюдении указанного требования сервопривод является безопасным для исследований.

5 Технико-экономическое обоснование проекта

В соответствии с техническим заданием на дипломное проектирование для исследовательских работ было приобретено необходимое оборудование и программное обеспечение. В данном разделе производится расчёт сметы затрат, связанных с их приобретением и обслуживанием.

Смета затрат - это выражение в денежной форме затрат предприятия на разработку и выполнение хозяйственно-договорной работы. Смета затрат будет складываться из затрат на:

- а) основное оборудование и программное обеспечение;
- б) заработную плату;
- в) амортизацию оборудования;
- г) аренду помещения.

Далее представлен расчет всех составляющих сметы затрат.

5.1 Расчет затрат на основное оборудование и программное обеспечение

Стоимость затрат на приобретение компонентов и программного обеспечения вычислим по формуле:

$$S_z = S_{об} + S_{прог}, \quad (12)$$

где $S_{об}$ – стоимость затрат на приобретение компонентов;

$S_{прог}$ – затраты на приобретение программного обеспечения.

Затраты на приобретение программного обеспечения приведены в таблице 5, затраты на приобретение оборудования – в таблице 6.

Таблица 5 – Стоимость программного обеспечения

Наименование	Стоимость, руб.
Microsoft Windows 7 Home Premium	5490
Microsoft Office 2016	18899
MATLAB and Simulink Student Suite	3430
Atmel studio 6.1	Бесплатная
Общая стоимость	27819

Таблица 6 – Стоимость компонентов

Наименование	Количество, шт.	Цена за шт., руб.	Сумма, руб.
Baldor brushless ac servomotor BSM50A-233AEA	1	25000	25000
Силовая плата с модулем PM30CSJ060	1	3200	3200
Плата с микроконтроллером ATXMEGA128A4U	1	800	800
NES-350-27, Блок питания	1	1300	1300
SMUN 201 Вт 15 В, Блок питания	1	851	851
Общая стоимость			31151

Общая стоимость затрат на приобретение компонентов и программного обеспечения равна:

$$S_3 = 27819 + 31151 = 58970 \text{ руб.} \quad (13)$$

5.2 Расчет фонда заработной платы разработчикам

В период разработки установки оклад ведущего инженера $S_{\text{окл.инж}}$ составил 10000 рублей в месяц.

Определим дневную заработную плату ведущего инженера:

$$S_{\text{зп.дн.инж}} = S_{\text{окл.инж}} / N, \quad (14)$$

где $N = 21$ – число рабочих дней в месяце. Тогда

$$S_{\text{зп.дн.инж}} = 10000 / 21 = 476 \text{ руб.} \quad (15)$$

Определим основную заработную плату руководителя дипломного проекта:

$$S_{\text{осн.инж}} = S_{\text{зп.дн.инж}} \cdot n, \quad (16)$$

где $n = 42$ – число рабочих дней за два месяца работы. Тогда

$$S_{\text{осн.инж}} = 476 \cdot 42 = 19992 \text{ руб.} \quad (17)$$

Дополнительная заработная плата:

$$S_{\text{доп.инж}} = S_{\text{осн.инж}} \cdot k_{\text{дз}}, \quad (18)$$

где $k_{\text{дз}} = 0,2$ – коэффициент дополнительной заработной платы. Тогда

$$S_{\text{доп.инж}} = 19992 \cdot 0,2 = 3998,2 \text{ руб.} \quad (19)$$

Размер надбавки к заработной плате с учетом районного коэффициента:

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

$$S_{рк.инж} = (S_{осн.инж} + S_{доп.инж}) \cdot k_{рк}, \quad (20)$$

где $k_{рк} = 0,3$ – районный коэффициент для Красноярска. Тогда

$$S_{рк.инж} = (19992 + 3998.2) \cdot 0.3 = 7197.1 \text{руб.} \quad (21)$$

Размер надбавки к заработной плате с учетом северного коэффициента:

$$S_{ск.инж} = (S_{осн.инж} + S_{доп.инж}) \cdot k_{ск}, \quad (22)$$

где $k_{ск} = 0,3$ – северный коэффициент для Красноярска. Тогда

$$S_{ск.инж} = (19992 + 3998.2) \cdot 0.3 = 7197.1 \text{руб.} \quad (23)$$

Полностью фонд заработной платы всех работников без отчислений на социальные нужды:

$$\Phi_{от.общ} = (S_{осн.инж} + S_{доп.инж} + S_{рк.инж} + S_{ск.инж}) \cdot Ч_p, \quad (24)$$

где $Ч_p$ – количество работников. Тогда

$$\Phi_{от.общ} = (19992 + 3998.2 + 7197.1 + 7197.1) \cdot 1 = 38384.44 \text{руб.} \quad (25)$$

После определения общего размера заработной платы произведем расчет отчислений на социальные нужды. Они берутся от фонда оплаты труда (суммы основной и дополнительной заработной платы) в размере 30,2% из них:

- единый социальный налог – 30%;
- тариф на обязательное медицинское страхование и профессиональные заболевания – 0,2%.

Таким образом,

$$S_{соц} = R_{соц} \cdot (S_{осн.инж} + S_{доп.инж}), \quad (26)$$

где $R_{соц} = k_{есн} + k_{омс}$,

$k_{есн} = 0,3$ – единый социальный налог;

$k_{омс} = 0,002$ – отчисления в фонд обязательного медицинского страхования. Тогда

$$S_{соц} = (0.3 + 0.002) \cdot (19992 + 3998.2) = 7245 \text{ руб.} \quad (27)$$

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

Всего фонд оплаты труда с отчислениями на социальные нужды:

$$\Phi_{отс} = \Phi_{от.общ} + S_{соц}; \quad (28)$$

$$\Phi_{отс} = 38384.44 + 7245 = 45629.44 \text{ руб.} \quad (29)$$

5.3 Затраты на электроэнергию

Исходные данные для расчета стоимости электроэнергии:

- мощность, потребляемая ПК с монитором – 200 Вт;
- мощность, потребляемая лампой дневного света – 18 Вт;
- тариф на электроэнергию – 2.26 руб./кВт · ч.
- количество ламп в помещении – 92 шт.

Расходы на электроэнергию в день:

$$S_{эл.д.} = (P_{ПК} + P_{л} \cdot n) \cdot N_{ч} \cdot T_{эл.} \cdot N_{д}, \quad (30)$$

где $P_{ПК}$ – мощность, потребляемая ПК с монитором, $P_{л}$ – мощность, потребляемая лампой дневного света, n – количество ламп дневного света, $T_{эл.}$ - тариф на электроэнергию, $N_{ч}$ – количество рабочих дней, $N_{ч}$ - часов рабочий день.

$$S_{эл.д.} = (200 + 18 \cdot 92) \cdot 8 \cdot 0.00226 \cdot 42 = 1409.37 \text{ руб.} \quad (31)$$

5.4 Затраты на амортизацию оборудования

Для расчёта затрат на амортизацию оборудования необходимо определить время эксплуатации каждого из элементов оборудования. Для работ по настройке и программированию робота, а также для составления дополнительного программного обеспечения использовался персональный компьютер.

Таким образом, суммарные затраты на амортизацию определяются по формуле

$$Z_A = Z_{AK}, \quad (32)$$

где Z_{AK} – затраты на амортизацию компьютера.

Определим затраты на амортизацию компьютера по формуле:

$$Z_{AK} = \frac{C_K \cdot n_m}{n_l \cdot 12}, \quad (33)$$

где C_K – первоначальная стоимость оборудования, $n_m = 2$ месяца – время использования, $n_l = 5$ лет – срок службы. Тогда

$$Z_{AK} = \frac{31151 \cdot 2}{5 \cdot 12} = 1038.37 \text{ руб.} \quad (34)$$

5.5 Расходы на аренду помещения

Расходы на аренду помещения за время разработки системы составили:

$$Z_{АП} = Z_{А1} \cdot П \cdot T_p, \quad (25)$$

где $Z_{А1} = 100$ руб. – стоимость аренды за один квадратный метр площади, $П = 101,6 \text{ м}^2$ – площадь помещения, $T_p = 2$ месяца – продолжительность этапа разработки. Тогда

$$Z_{АП} = 100 \cdot 101.6 \cdot 2 = 20320 \text{ руб.} \quad (26)$$

5.6 Смета затрат

Все затраты, связанные с приобретением и использованием оборудования и программного обеспечения, амортизацию, оплату труда и аренду помещения, приведены в таблице 7 и показаны в долевым соотношении на рисунке 7.1.

Таблица 7 – Смета затрат

Наименование затрат	Сумма затрат, руб.
Затраты на программное обеспечение и оборудование	58970
Фонд оплаты труда	45629.22
Затраты на амортизацию оборудования	1038.37
Расходы на аренду помещения	20320
Затраты на электроэнергию	1409,47
Итого	126995,9



Рисунок 7.1 – Диаграмма затрат

5.7 Выводы по разделу

В данном разделе определена смета затрат на дипломное проектирование для исследовательских работ. Как видно из таблицы 7, большая часть затрат обусловлена закупкой оборудования и программного обеспечения.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были решены следующие задачи:

- рассмотрены различные электрические машины с точки зрения их применения в сервоприводе;
- выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами как оптимальное решение для сервопривода станков, роботов и других точных машин;
- выбран метод управления СДПМ;
- изучено векторное управление СДПМ;
- разработано ПО микроконтроллера реализующее векторное управление;
- исследована работа полученной системы.

Последовательное выполнение поставленных задач позволило разработать сервопривод на основе синхронного привода.

Оптимальным методом управления выбрано векторное управление СДПМ, написанная программа позволяет задавать желаемую скорость и коэффициенты регуляторов для желаемого переходного процесса. Помимо этого, обеспечен вывод некоторых характеристик по UART, которые можно отслеживать в реальном времени с помощью программы в приложении Б для Matlab.

Таким образом, полученные результаты подтверждают работоспособность системы векторного управления СДПМ, а также выполнение требований Задания на ВКР. Дальнейшее направление работы по теме ВКР может быть связано с разработкой алгоритмов управления по заданию угла поворота, а также его удержание. Кроме того, остались открытыми вопросы, связанные с повышением качества переходного процесса.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008.- 298 с.
2. Полфунтиков Е.Ю. Тяговый двигатель с постоянными магнитами./ Сборник научных трудов НГТУ. – 2009, № 2(56). – С. 141–146.
3. Нургалеев А.Р., Павлова З.Х., Шабанов В.А. Перспективы использования вентильного электропривода в нефтяной и газовой промышленности./ Уфимский государственный нефтяной технический университет. – [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа:
http://www.rusnauka.com/13_EISN_2013/Tecnic/5_137070.doc.htm (дата обращения: 29.05.2018).
4. Корельский В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами./ Научный журнал «Радиоэлектроника. Информатика. Управление», 2001. - С. 155-159.
5. Ковальчук Д.А., Мазур А.В. Векторное управление синхронным электродвигателем. // «Автоматизация технологических и бизнес процессов». [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Одесса: Одесская национальная академия пищевых технологий. – 2014, №17 - С. 71-75. – Режим доступа: <http://dropdoc.ru/doc/453471/vektornoe-upravlenie-sinhronnym-e-lektrodvigatelem.pdf> (дата обращения: 29.05.2018).
6. Завьялов В.М, Абд Эль Вхаб А. Р. Дифференциальное управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. // «Современный электропривод». – 2012, № 1 – С. 8-15.
7. Ryvkin Sergey . Sliding mode for synchronouselectric drive / Eduardo Palomar Lever–CRC Press–2011, – 208 с.
8. Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Репин А.А. Методика синтеза системы управления синхронным двигателем на основе синергетического подхода. // «Вестник ИГЭУ» – 2005, № 3.
9. Абд Эль Вхаб А. Р., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. // «Известия Томского политехнического университета» – 2011, Т. 319, №4. С– 93–99.
10. Горобец Н.М. Исследование современных сервоприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Донецк: ДонТУ – Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2009/eltf/gorobets/report/index.htm> (дата обращения: 04.03.2016).

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
РиТК
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Г.Б. Масальский

подпись
« 13 » « 06 » 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Разработка сервопривода на базе синхронного двигателя

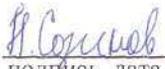
Руководитель


подпись, дата

от. претидаватель
должность, ученая степень

А.А. Гагарский

Студент


подпись, дата

13.06.18

Н.А. Созинов

Нормоконтролер


подпись, дата

13.06.18

В.Н. Куликова

Красноярск 2018