

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Направление	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника
Магистерская программа	140452.68 – Автоматизированные электро-механические комплексы и системы
Факультет	ЭА
Кафедра	РАПС

К защите допустить

Зав. кафедрой

М.П. Белов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТРА**

**Тема: РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МАНИПУЛЯТОРА**

Студент		<hr/>	А.Б. Хакимов
		<i>подпись</i>	
Руководитель	к.т.н., доцент (Уч. степень, уч. звание)	<hr/>	А.Ю. Омельченко
		<i>подпись</i>	
Консультант по БЖД	к.т.н., доцент (Уч. степень, уч. звание)	<hr/>	А.Н. Иванов
		<i>подпись</i>	
Консультант по нормоконтролю	к.т.н., доцент (Уч. степень, уч. звание)	<hr/>	Л.П. Козлова
		<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург
2019

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю
Зав. кафедрой РАПС
М.П. Белов
«___» _____ 20__ г.

Студент Хакимов А.Б.

Группа 3403

Тема работы: Разработка и исследование системы управления электроприводом манипулятора

Место выполнения ВКР: кафедра РАПС СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Исходные данные (технические требования): научно-техническая литература, техническая документация по роботу РМ-01.

Содержание ВКР: обзор способов управления электроприводами роботов манипуляторов, описание верхнего уровня аппаратной части электропривода манипулятора, разработка драйвера управления двигателями постоянного тока

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал, презентация, схема электрическая принципиальная.

Дополнительные разделы: Специальные вопросы обеспечения безопасности.

Дата выдачи задания
«___» _____ 2019 г.

Дата представления ВКР к защите
«___» _____ 2019 г.

Студент

А.Б. Хакимов

Руководитель к.т.н. доцент
(Уч. степень, уч. звание)

А.Ю. Омельченко

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю
Зав. кафедрой РАПС

М.П. Белов
« ____ » _____ 20 ____ г.

Студент Хакимов А.Б.

Группа 3403

Тема работы: «Разработка и исследование системы управления электроприводом манипулятора».

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	10.10.17 – 20.12.17
2	Описание верхнего уровня аппаратной части электропривода манипулятора	15.02.18 – 23.05.18
3	Разработка драйвера для силового преобразователя двигателей постоянного тока	20.06.18 – 27.12.18
4	Оформление пояснительной записки	6.02.19 – 12.05.19
5	Оформление иллюстративного материала	14.05.19 – 18.05.19

Студент

Хакимов А.Б.

подпись

Руководитель

к.т.н., доцент
(Уч. степень, уч. звание)

Омельченко А.Ю.

подпись

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 74 с., 46 рисунков, 6 таблиц, 8 источников, 3 приложения.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ РОБОТ-МАНИПУЛЯТОР, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПЛИС, ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ДРАЙВЕР, ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Проведен сравнительный обзор электродвигателей, применяемых в робототехнике, а также способов их управления. Более подробно рассмотрен импульсный способ управления двигателем постоянного тока.

Описан верхний уровень аппаратной части электропривода манипулятора.

Разработан драйвер управления для двигателей постоянного тока и интегрирован в ПЛИС ЕРМ570Т100І5.

ABSTRACT

Explanatory note 76 pages, 46 figures, 4 tables, 8 sources, 5 applications.

INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATOR, CONTROL SYSTEM,
ELECTRIC DRIVE, FPGA, PWM CONVERTER, DRIVER, DC MOTOR.

The comparative review of electric motors used in robotics is carried out, as well as methods of their control. The impulse method of DC motor control is considered in more detail.

A control driver for DC motors has been developed and integrated into the EPM570T100I5 FPGA model.

Содержание

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1. Обзор способов управления электроприводами роботов манипуляторов.....	9
1.1 Обзор электродвигателей используемых в робототехнике	9
1.2 Сравнительный анализ способов управления ДПТ НВ	18
1.3 Импульсное управление двигателем постоянного тока.....	21
1.4 Обзор драйверов управления двигателями постоянного тока	27
2. Описание верхнего уровня аппаратной части электропривода манипулятора.....	33
2.1 Формирователь широтно-импульсного модулированного сигнала	34
2.2 Обработка сигнала энкодеров.....	39
3. Разработка драйвера для силового преобразователя двигателей постоянного тока.	41
3.1 Постановка задачи.....	43
3.2 Описание программного пакета Quartus II	46
3.3 Построение схем с использованием графического редактора	49
3.4 Привязка входов и выходов схемы к выводам ПЛИС	53
4 Специальные вопросы обеспечения безопасности.....	56
4.1 Функциональная безопасность	56
4.2 Электромагнитная совместимость	59
4.3 Электробезопасность	62
4.4 Степени защиты изделия	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67
Приложение А. Листинг программного кода.....	68
Приложение Б. Привязка контактов микросхемы	71
Приложение В. Электрическая схема подключения драйвера.....	73

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДПТ – двигатель постоянного тока

ДПТ НВ – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением;

ДПТ ПсВ – двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением;

ДПТ ПрВ – двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением;

МУП – модуль управления приводом;

УЧПУ – устройство с числовым программным управлением;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ШИП – широтно-импульсный преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день применение промышленных роботов считается основной высокотехнологического и конкурентоспособного производства, которое стремится сочетать высокую производительность, качество при минимальных затратах. Внедрение промышленных роботов из года в год увеличивается, охватывая всё больше отраслей промышленности.

Движение звеньев робота происходит по большей части за счет электро-механических приводов, получивших широкое распространение за их удобство в эксплуатации, высокий КПД и простоту управления. Несмотря на простую концепцию, электромеханические приводы на основе двигателей постоянного тока (ДПТ) продолжают применять в робототехнике. Это связано, прежде всего, легкостью регулирования и возможностью построения следящего привода. А также, простотой монтажа, наладки и обслуживания при эксплуатации. В настоящее время для управления ДПТ чаще всего используют импульсное управление, для них характерна надежность и плавность регулирования.

В задачи данной выпускной квалификационной работы входит разработка и исследование системы управления электроприводом робота манипулятора РМ-01. Разработка вызвана в связи отсутствием нижнего уровня управления, предназначенного для решения задач регулирования параметров движения (скорость, положение). Применение разработанного робототехнического комплекса, поможет выпускать востребованных специалистов в области робототехники, а также пополнить ряды учебных роботов для проведения практических и лабораторных работ.

1. Обзор способов управления электроприводами роботов манипуляторов

Электромеханические приводы, применяемые в робототехнике отличаются доступностью энергоносителя, легкостью регулирования, простотой монтажа и наладки. В качестве таких двигателей, как правило, используется двигатели постоянного тока с независимым или последовательным возбуждением, а также асинхронные двигатели.

К электроприводам роботов предъявляют весьма жесткие требования, такие как:

- жесткие механические характеристики в связи с работой, требующей высокие динамические показатели для выполнения сложных управляющих движений;
- повышенную реакцию на управляющие сигналы и точность их обработки;
- строгие требования к способам управления электроприводами роботов;
- помехоустойчивость для подвижных роботов. [1]

1.1 Обзор электродвигателей используемых в робототехнике

Электромеханический привод, применяемый в робототехнике, по электромеханическому преобразователю бывают двух видов:

- двигатели постоянного тока;
- двигатели переменного тока.

Каждый из них по-своему выгоден, использование тех или других видов в целом зависит от поставленных задач. В большинстве случаев, независимо от типа, электродвигатели состоят из статора и ротора и работают посредством взаимодействия магнитного потока и электрического тока для создания скорости вращения и момента.

ДПТ в свою очередь бывают коллекторные и бесколлекторные. Коллекторные двигатели делятся на три вида, и различия между ними зависят от того, как двигатель генерирует свое магнитное поле возбуждения. Если поле создается независимо (например, постоянным магнитом), то двигатель называется двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Рисунок 1.1 иллюстрирует структуру ДПТ НВ.

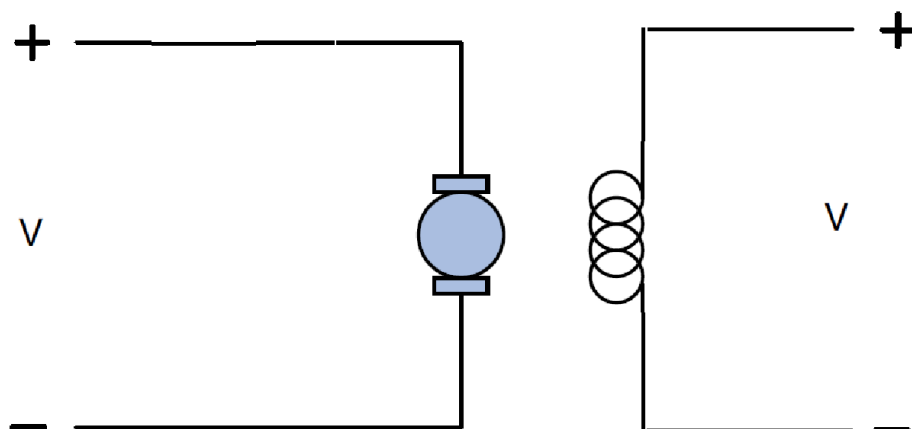


Рисунок 1.1 – Схема независимого возбуждения ДПТ

ДПТ НВ являются наиболее популярными коллекторными двигателями, из-за того что обмотка возбуждения имеет независимое питание, магнитное поле остается надежно постоянным, это позволяет легко регулировать скорость вращения двигателя.

Следует отметить, что в большинстве случаев в качестве независимого источника возбуждения используются постоянные магниты, они имеют свойство со временем терять свою намагниченность. Это означает, что двигатель постепенно будет создавать меньше крутящего момента и скорости, что является недостатком таких типов двигателей.

Два других вида имеют катушки возбуждения, которые включаются в цепь питания двигателя последовательно или параллельно, и называются двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ ПсВ) и

двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением (ДПТ ПрВ) соответственно.

В ДПТ ПсВ обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой ротора, это значит, что ток, поступающий в обмотку возбуждения одинаковый, как ток, поступающий в якорь. Рисунок 1.2 иллюстрирует такую схему.

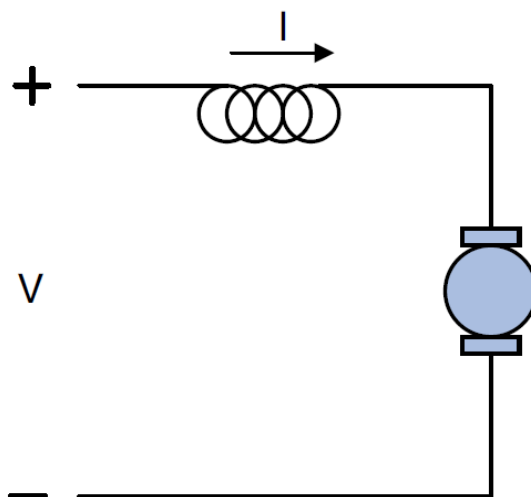


Рисунок 1.2 – Схема последовательного возбуждения ДПТ

Чтобы понять значимость двигателей с последовательным возбуждением важно понимать, что происходит при увеличении тока. Как известно, увеличение тока приводит и к увеличению крутящего момента. Но для ДПТ ПсВ увеличение тока также приводит к увеличению магнитного поля, что дополнительно увеличивает крутящий момент. Вот почему крутящий момент, создаваемый ДПТ ПсВ намного больше, чем при ДПТ НВ.

Недостатком использования таких двигателей является управление скоростью. Напряженность магнитного поля изменяется с током, что затрудняет надежную настройку скорости двигателя.

В ДПТ ПрВ обмотка возбуждения расположена параллельно якору. Это означает, что напряжение на обмотке возбуждения равно напряжению на якоре. Такая схема приведена на рисунке 1.3.

В этом случае кривая крутящий момент/скорость, как правило, более ровная. То есть двигатель может поддерживать свою скорость при разных нагрузках.

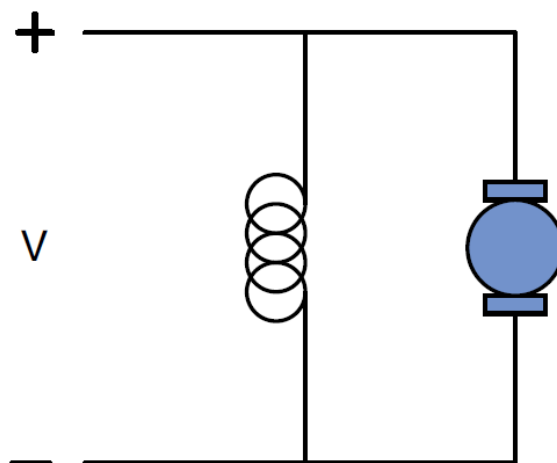


Рисунок 1.3 – Схема параллельного возбуждения ДПТ

Поэтому такие двигатели обычно используют в системах, где необходимо надежно регулировать скорость двигателя.

Из-за дешевой конструкции, легкости регулирования, высокого стартового крутящего момента, коллекторные двигатели постоянного тока широко используются в небольших инструментах, приборах, автомобилях, а так же в робототехнике.

Бесколлекторные двигатели являются более дорогими и сложными по сравнению коллекторными. Этот тип двигателя не питается от электричества постоянного тока, а вместо этого получает синхронизированные импульсы постоянного тока. В них не содержится щеточно-коллекторный узел, из-за этого они более надежны и эффективны. Как показано на рисунке 1.4, структура бесколлекторного двигателя полностью отличается от щеточного двигателя. Здесь имеется несколько токоведущих проводов, которые расположены в статоре вместо ротора. Провода, намотанные на железный сердечник, образуют электромагниты. Общая работа бесщеточных двигателей не является сложной для понимания. Контроллер последовательно подаёт положительный и отрицательный ток на разные обмотки, и ротор вращается, следуя за изменением тока.

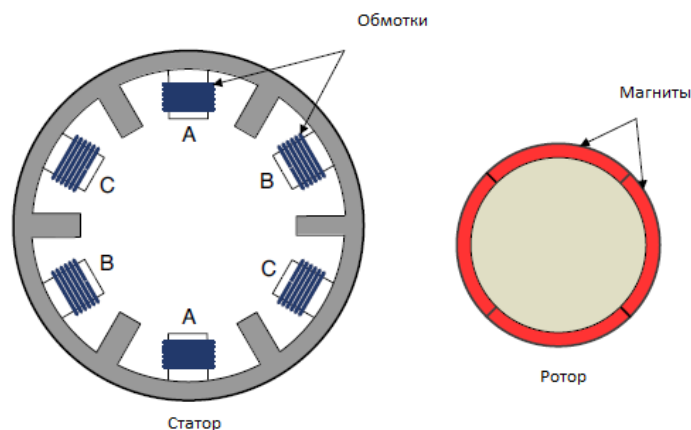


Рисунок 1.4 – Структура бесколлекторного двигателя

Для правильной работы таких двигателей, управляющие импульсы должны быть рассчитаны таким образом, чтобы ток подавался в тот момент, когда ротор находится в правильном положении. Чтобы определить положение ротора, измеряют противо-ЭДС, создаваемую при вращении, либо считывают положение ротора с помощью датчиков, встроенных в двигатель. Это приводит к более сложной структуре двигателя и относительному усложнению его управления. [2]

Двигатели переменного тока, применяемые в робототехнике, по большей части представлены асинхронными электрическими двигателями. Асинхронные машины делятся на однофазные и трехфазные. Однофазные переменные двигатели используются, в большей степени, в бытовых применениях, для больших мощностей требуется трехфазная сеть.

Асинхронный двигатель состоит из статора и ротора. На статоре расположены обмотки, на которые подается переменный ток. Когда на статор двигателя подается трехфазное напряжение, образуется круговое вращающееся поле, которое наводит электродвижущую силу в обмотке ротора. ЭДС вызывает ток ротора, который вместе магнитным потоком статора производит момент. Скорость вращения ротора не равна скорости вращения магнитного поля статора, отсюда происходит название «асинхронный». Ротор асинхронной машины бывает двух типов: короткозамкнутый и фазный. Короткозамкнутый ротор состоит из стальных пластин с алюминиевыми или медными проводниками, концы

которых замыкают короткозамыкающие кольца (беличье колесо). На рисунке 1.5 представлена конструкция такого ротора.

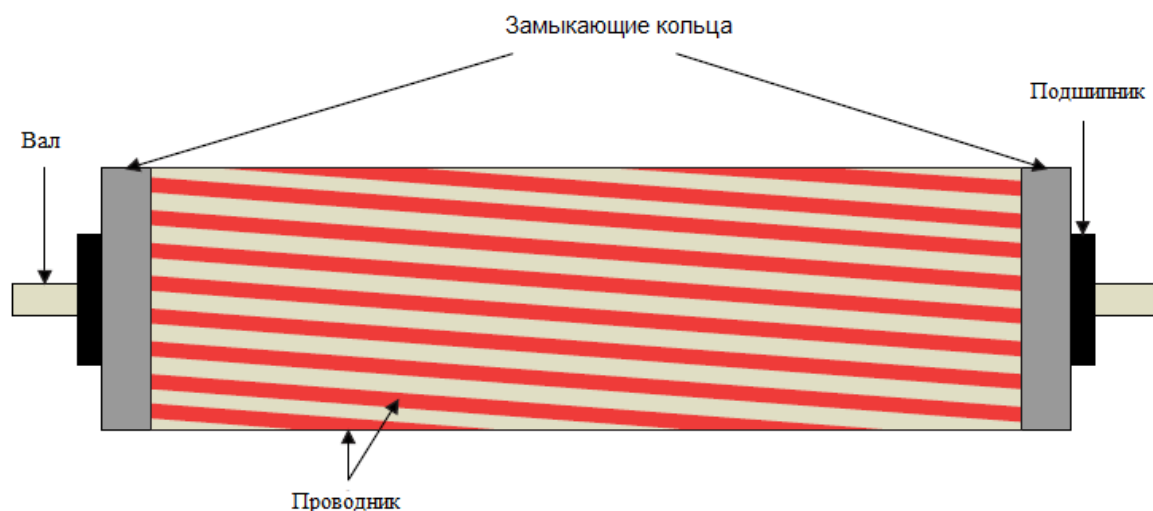


Рисунок 1.5 – Конструкция короткозамкнутого ротора

Фазный ротор обычно представляет собой трехфазную обмотку, соединенную по схеме «звезда», концы обмоток которой выведены на контактные кольца расположенные на валу. На рисунке 1.6 изображена схема устройства фазного ротора.

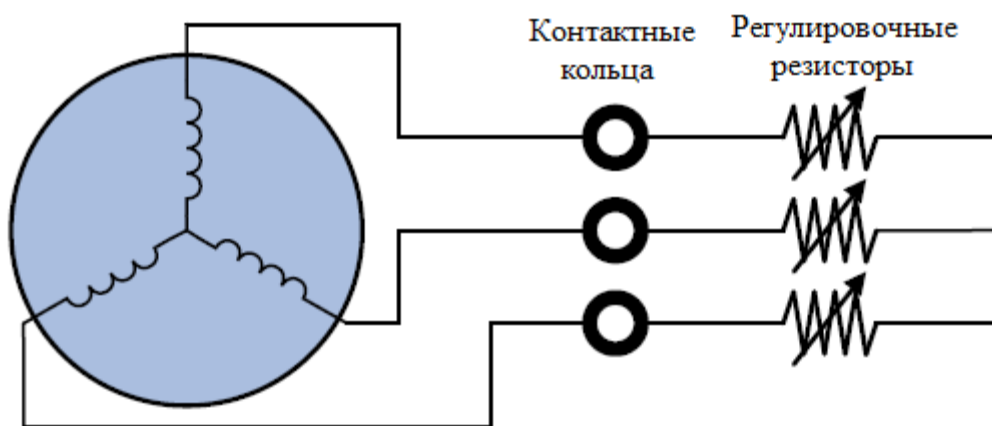


Рисунок 1.6 – Схема устройства фазного ротора

Регулировочные резисторы предназначены для уменьшения пускового тока и улучшения регулировочных характеристик двигателя. На рисунке 1.7

показана взаимосвязь между моментом и скоростью для фазного ротора при различных сопротивлениях.

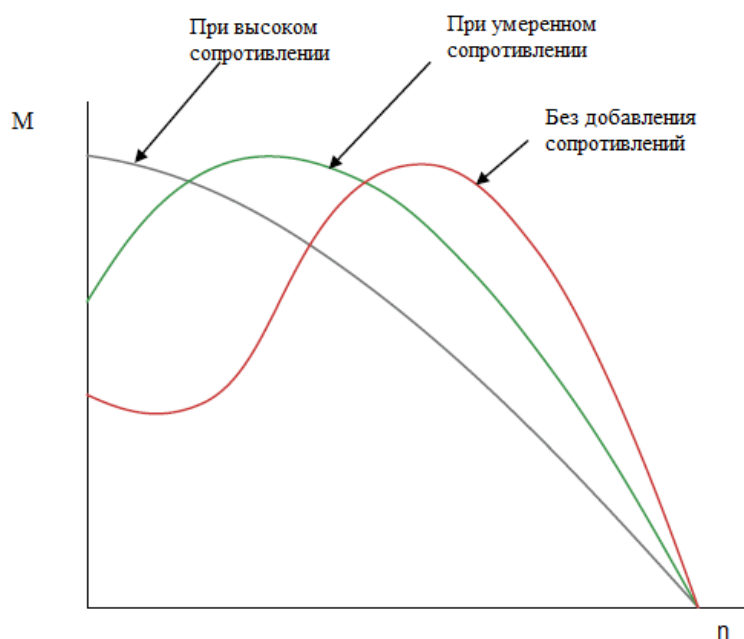


Рисунок 1.7 – Влияние регулировочных резисторов на механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

Асинхронные двигатели с фазным ротором используются в областях, где требуется высокий пусковой момент и там, где необходимо приводить в движение механизмы с высокой инерционной нагрузкой.

Следует отметить, что если раньше в роботах применяли только двигатели постоянного тока, то на сегодняшний день все больше и больше моделей роботов оснащаются двигателями переменного тока. Это происходит из-за бурного развития микроэлектроники, а также усовершенствования способов управления такими двигателями. Можно выделить следующие их ключевые преимущества:

- регулируемая рабочая скорость;
- контролируемый пусковой ток;
- контролируемое ускорение;
- сниженное энергопотребление;

– низкая стоимость.

На сегодняшний день построение систем с использованием асинхронных двигателей с преобразователями частоты, в связке программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) позволяет эффективно решать производственные задачи. [3]

Следует упомянуть шаговые двигатели. Такой двигатель способен вращаться на точный угол и останавливаться. Важным их преимуществом является то, что контроллеру нет необходимости считывать положение ротора. Если шаговый двигатель рассчитан на поворот $2,5^\circ$ на один управляющий импульс, то он повернет именно на этот угол. Также они характеризуются следующими показателями: угловое разрешение (т.е. чем меньше угол шага, тем больше угловое разрешение) и крутящий момент (удерживающий момент). По конструкции ротора шаговые двигатели бывают:

1. С постоянными магнитами – обеспечивают высокий крутящий момент, плохое угловое разрешение;
2. Реактивный – характеризуются отличным угловым разрешением, но обладают низким крутящим моментом;
3. Гибридный – сочетает в себе структуру вышеперечисленных, обеспечивая хорошие показатели крутящего момента и углового разрешения. Конструкция такого двигателя рассматривается ниже.

Ротор гибридного шагового двигателя выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита, который разделен на две части (рисунок 1.8).

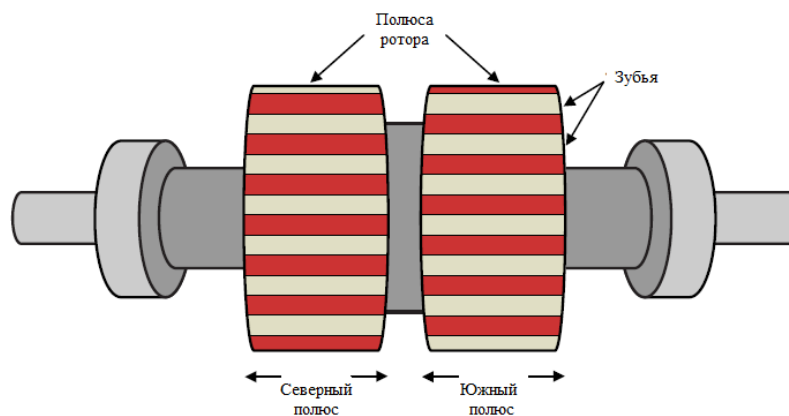


Рисунок 1.8 – Устройство ротора гибридного шагового двигателя

Один из частей намагничен как северный полюс, а другой как южный, и у каждого есть ряд зубцов по периметру, которые притягиваются к аналогичным зубьям на статоре (Рис. 1.9).

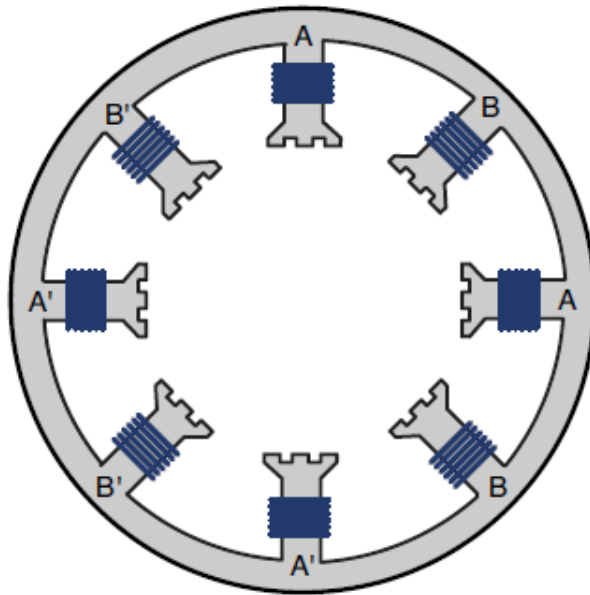


Рисунок 1.9 – Устройство статора гибридного шагового двигателя

Преимуществам шаговых электродвигателей можно отнести:

- точное позиционирование;
- большой крутящий момент на низких скоростях;
- долговечность;
- надежность;
- гибкость.

К недостаткам относят:

- низкую эффективность;
- низкий крутящий момент на высоких скоростях;
- проскальзывание ротора;
- высокий шум на средних и высоких скоростях.

1.2 Сравнительный анализ способов управления ДПТ НВ

Скорость двигателя постоянного тока независимого возбуждения описывается уравнением:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_E \Phi}, \quad (1)$$

где n – частота вращения вала двигателя;

U – напряжение подаваемое на якорь;

$I_{\text{я}}$ – ток в цепи якоря;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря;

Φ – магнитный поток возбуждения;

c_E – конструктивная константа.

Из этого уравнения следует, что скорость двигателя может регулироваться путем изменения следующих параметров:

1. Питающего напряжения двигателя U ;
2. Сопротивления якорной обмотки $R_{\text{я}}$;
3. Магнитного потока возбуждения Φ .

При первом способе (U) изменение скорости двигателя достигается путем изменения приложенного напряжения в обмотке якоря двигателя. На практике, как правило, этот способ осуществляется с помощью полупроводниковых преобразователей напряжения. Данный метод хорош тем, что скорость можно регулировать плавно и в широком диапазоне. Регулирование частоты вращения, идет как правило, вниз от основной скорости, поскольку увеличение ЭДС преобразователя выше номинального напряжения двигателя недопустимо. Искусственные характеристики при изменении U будут иметь вид прямых, как показано на рисунке 1.10.

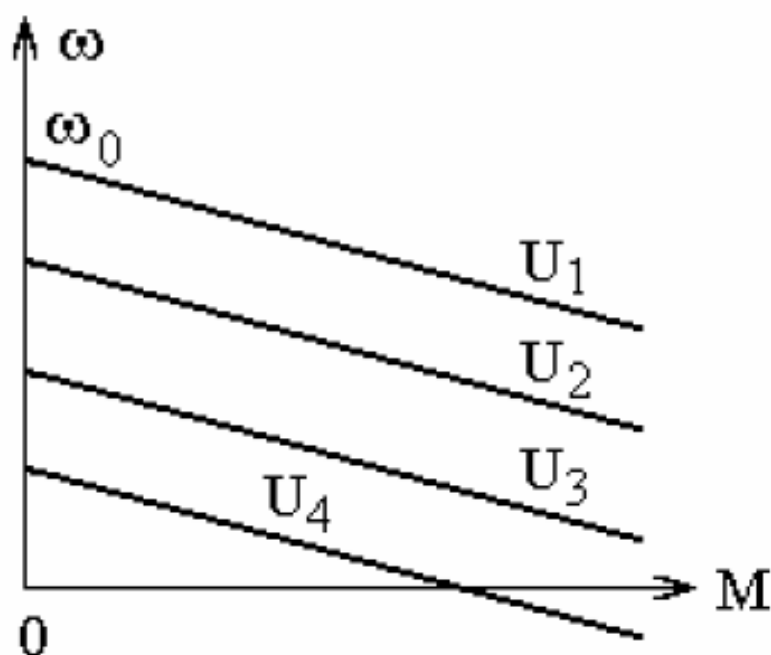


Рисунок 1.10 – Механические характеристики ДПТ НВ при изменении питающего напряжения

Второй метод используется, когда требуется регулировать скорость ниже основной. Поскольку напряжение питания в этом случае является постоянным, напряжение на якоре изменяется путем добавления резисторов в цепь якоря. Регулировочные характеристики такого метода приведены на рисунке 1.11. Оценим возможности реостатного регулирования скорости.

1. Регулирование однозонное, вниз от основной характеристики
2. Диапазон регулирования обычно небольшой и снижается по мере снижения нагрузки, а в режиме холостого хода изменение $R_{\text{доп}}$ вообще не приводит к изменению скорости, поскольку все характеристики пересекаются при скорости ω_0 .
3. Стабильность скорости низкая и снижается по мере расширения диапазона регулирования скорости.
4. При неизменном магнитном потоке, равном номинальному значению, длительно допустимая нагрузка на любой регулировочной характеристике равна номинальному моменту

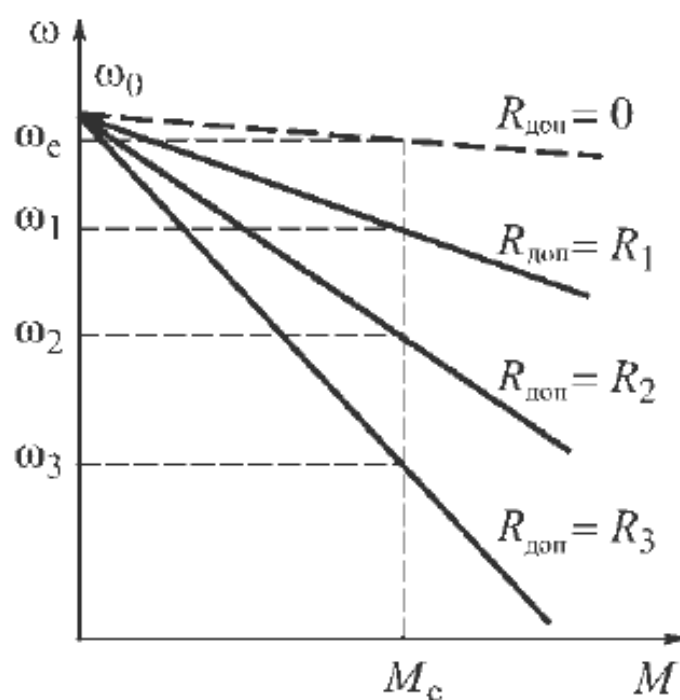


Рисунок 1.11– Механические характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании скорости

Третий способ на практике реализовано двумя способами: реостатом в цепи обмотки возбуждения при неизменном напряжении питания и изменением входного напряжения, питающего обмотку возбуждения. Очевидно, второй способ энергетически выгоднее, но дороже, поскольку используется преобразователь питания обмотки возбуждения, поэтому для двигателей малой мощности применяют преимущественно первый способ.

На рисунке 1.12 показаны естественные и искусственные механические характеристики двигателя для двух значения потока $\Phi_2 < \Phi_1$. Как видно при ослаблении магнитного потока Φ , растет скорость идеального холостого хода, а момент по мере ослабления потока уменьшается. Важным обстоятельством, является то, что при ослаблении потока ограничены значения длительно допустимых нагрузок на валу двигателя, так как избыточное уменьшение магнитного потока может привести к поломке электродвигателя.

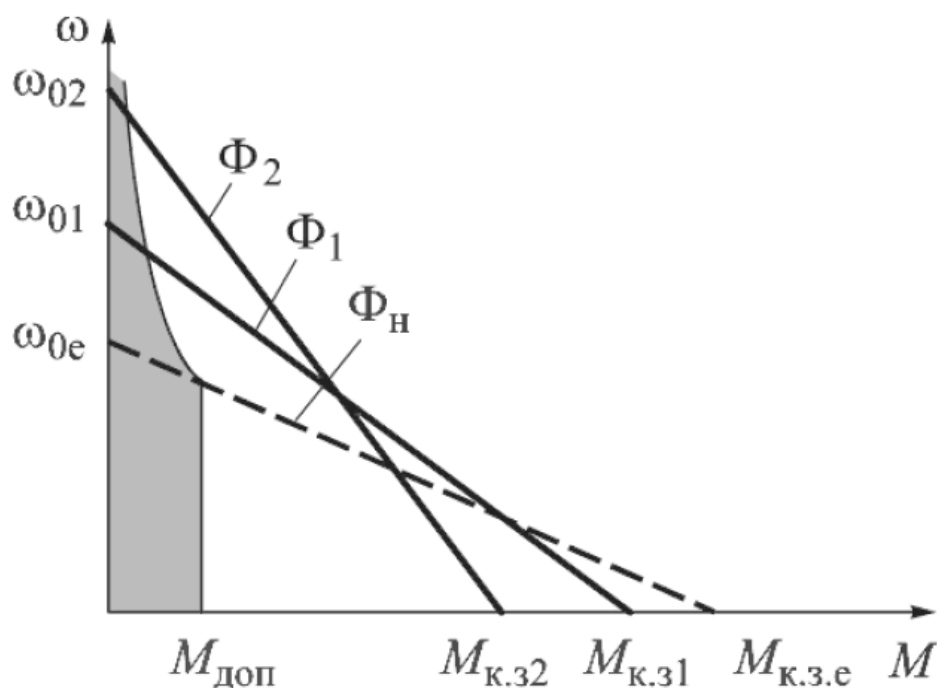


Рисунок 1.12 – Механические характеристики ДПТ НВ при изменении потока возбуждения

Оценив данный способ регулирования, можно сделать следующие выводы:

- регулирование однозонное, вверх от основной скорости;
- регулирование плавное, поскольку оно осуществляется в относительно маломощной цепи обмотки возбуждения и плавное изменение тока возбуждения технически достижимо;
- достаточно высокая стабильность регулирования скорости.

1.3 Импульсное управление двигателем постоянного тока

В настоящее время, для управления двигателями постоянного тока с независимым потоком возбуждения, преимущественно используются импульсное управление. Рассмотрим идею такого построения на простейшем примере – при подключении нагрузки в виде резистора R_H к источнику постоянного напряжения U_d с через идеальный ключ K_L (рисунок 1.13,а). При периодическом замы-

кании и размыкании ключа к нагрузке прикладывается напряжение U_d в виде прямоугольных импульсов амплитудой U_{dc} , как показано на временной диаграмме на рисунке 1.13, б.

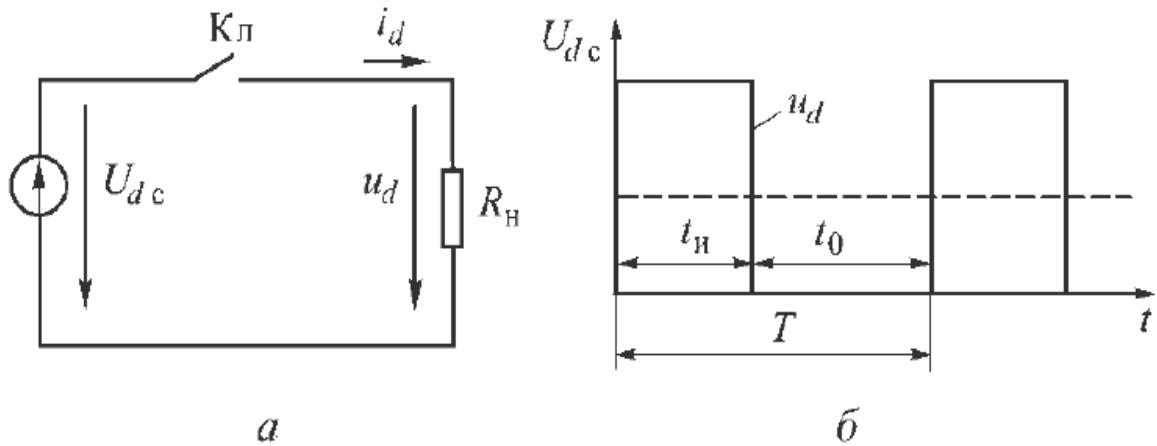


Рисунок 1.13 – Простейший импульсный преобразователь на основе одного ключа и временная диаграмма его работы

Отношение периода T следования импульсов к их длительности $t_{\text{и}}$ называют скважностью:

$$q = \frac{T}{t_u}, \quad (2)$$

а обратную ей величину – коэффициентом заполнения:

$$\gamma = \frac{1}{q} = \frac{t_u}{T}. \quad (3)$$

При изменении соотношения между длительностями интервалов импульса $t_{\text{и}}$ и паузы t_0 изменяется среднее значение напряжения на резисторе U_d . Регулирование, при котором поддерживается постоянство периодов следования импульсов напряжения на нагрузке, т.е. выполняется условие $T = t_{\text{и}} + t_0 = \text{const}$, получило название широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а устройства, которые ее реализуют, называют широтно-импульсными преобразователями

(ШИП). Записав выражение для среднего значения напряжения на нагрузке, получаем уравнение регулировочной характеристики рассматриваемого ШИП:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{t_H} U_{dc} dt = U_{dc} \frac{t_H}{T} = U_{dc} \cdot \gamma. \quad (4)$$

В случае активной нагрузки, протекающий через нее ток i_d , как известно, повторяет форму напряжения u_d , т.е. также имеет форму прямоугольных импульсов.

Если рассматриваемый ШИП подключить к активно-индуктивной нагрузке, что характерно для электропривода, то для исключения опасных перенапряжений при размыкании ключа K_L эта схема должна быть дополнена обратным диодом VD (рисунок 1.14, а). При замкнутом ключе K_L ток в нагрузке i_d нарастает, поскольку она подключена к источнику питания, а при разомкнутом ключе ток i_d спадает, так как цепь нагрузки оказывается замкнутой накоротко через обратный диод.

При достаточно большой частоте коммутации ключа K_L ток i_d не успевает при отключении нагрузки от источника питания U_{dc} снизиться до нуля и становится непрерывным (рисунок 1.14, б). Это основной режим ШИП в электроприводе. При этом, однако, ток i_c , потребляемый из источника питания, имеет форму импульсов, т.е. является разрывным.

Обратим внимание на то, что входной ток ШИП i_d имеет пульсирующий характер. Обычно его представляют в виде двух составляющих – основной, или постоянной, составляющей I_d , определяемой как среднее значение тока i_d за период его изменения T , и пульсирующий относительно ее высокочастотной составляющей. Амплитуда Δi и частота изменения высокочастотной составляющей $f = \frac{1}{T}$ являются важнейшими характеристиками неидеальности ШИП как преобразователя электрической энергии постоянного тока.

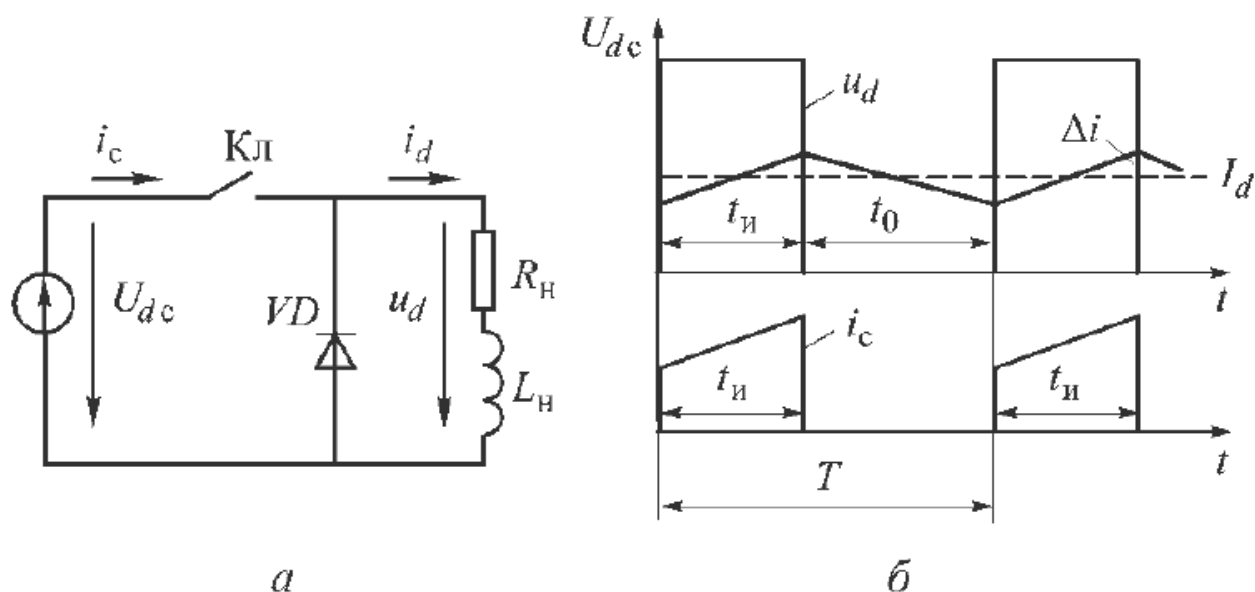


Рисунок 1.14 – Схема (а) и временные диаграммы (б) работы простейшего ШИП с активно-индуктивной нагрузки

Следует при этом еще раз подчеркнуть, что входное напряжение импульсных преобразователей не является постоянным, однако нагрузка, на которую они работают в электроприводе, обычно обладает свойствами фильтра, т.е. позволяет выделить постоянную составляющую этого напряжения. Поэтому по отношению к такой нагрузке ШИП может рассматриваться как источник постоянного регулируемого напряжения.

Простейшие ШИП, выполненные на базе одного ключа, не обеспечивают изменение полярности выходного напряжения и направления тока в нагрузке, т.е. они имеют выходные характеристики $U_d(I_d)$, располагаемые только в I квадранте. В результате такие ШИП не обеспечивают режимов реверса и рекуперативного торможения питаемых от них двигателей постоянного тока. Эти режимы обеспечиваются реверсивными ШИП, выполненными по мостовой схеме. Принцип их построения поясняет рисунок 1.15. Мостовой ШИП содержит четыре транзистора VT1 – VT4 и четыре обратных диода VD1 – VD4, причем каждый из диодов шунтирует соответствующий транзистор и служит для его защиты от перенапряжений. Транзисторы и параллельные им диоды в совокупности образуют мостовую схему, одна из диагоналей которой соединена ис-

точником питания напряжением U_{dc} , а к другой диагональ подключена нагрузка в виде якорной цепи двигателя постоянного тока.

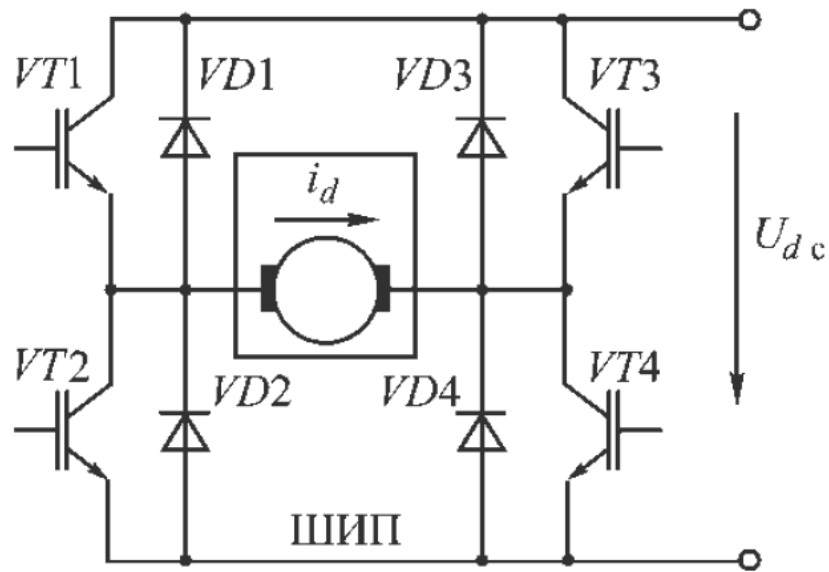


Рисунок 1.15 – Схема мостового ШИП

Принципиально в этой схеме можно реализовать различные алгоритмы переключения ключевых элементов. В наиболее простом случае они коммутируются с некоторой частотой попарно – поочередно открываются два диагонально расположенные схеме транзистора, а два ранее открытых транзистора при этом закрываются. Такой алгоритм переключений транзистора называют симметричным. В частности, при открытых транзисторах VT1 и VT4 к нагрузке прикладывается напряжение источника U_{dc} в положительной полярности, а при закрывании этих транзисторов и при открывании транзисторов VT3 и VT2 – в отрицательной. В результате напряжение на нагрузке u_d имеет вид двухполярных импульсов, изменяющихся в пределах от U_{dc} до $-U_{dc}$ (рисунок 1.16). Обозначив длительность импульса положительной полярности $t_{и}$, находим среднее значение напряжения на нагрузке при двухполярной ШИМ:

$$U_d = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{и}} U_{dc} dt + \int_{t_{и}}^T -U_{dc} dt \right) = U_{dc} \frac{2t_{и} - T}{T} = U_{dc} (2\gamma - 1) \quad (5)$$

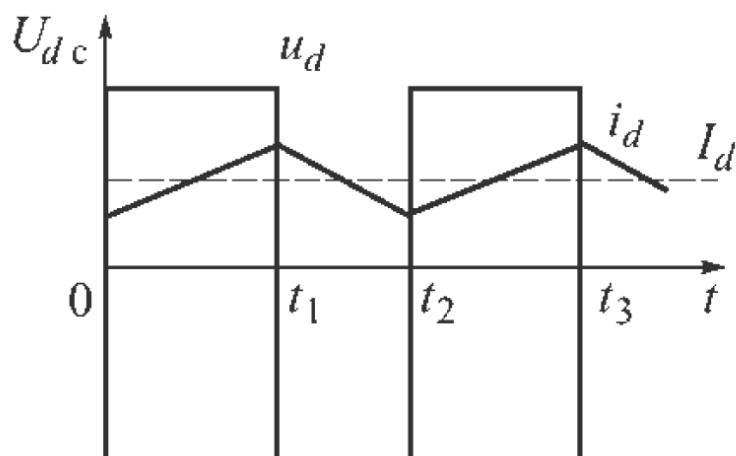


Рисунок 1.16 – Временные диаграммы работы мостовой схемы ШИП при симметричной коммутации

Из полученного соотношения (5), которое, по аналогии с соотношением (4), является уравнением регулировочной характеристики ШИП при двухполярной модуляции выходного напряжения, видно, что при изменении γ от 0 до 0,5 среднее значение напряжения на нагрузке положительно, а если γ находится в пределах от 0,5 до 1, оно изменяет знак, т.е. становится отрицательным. Рассмотрим принцип работы ШИП с симметричной коммутацией подробнее. Предположим, что ток в нагрузке i_d пульсирует относительно неизменного среднего значения I_d . Положительное направление тока i_d показано стрелкой на рисунке 1.14.

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, представлены на рисунке 1.16. В интервале времени $0 - t_1$ открыты транзисторы VT1 и VT4, к нагрузке прикладывается напряжение U_{dc} положительной полярности и ток i_d возрастает по экспоненциальному закону. При этом в индуктивности якоря двигателя наводится ЭДС самоиндукции, направленная встречно прикладываемому напряжению. [4]

При закрытии транзисторов VT1 и VT4 и открытии VT2 и VT3 в интервале времени $t_1 - t_2$ к нагрузке прикладывается напряжение противоположной полярности, и ток в ней i_d начинает спадать тоже по экспоненте, протекая, тем не менее, в прежнем направлении, что объясняется инерционными свойствами

нагрузки. ЭДС самоиндукции изменяет знак и теперь уже совпадает по направлению с током. Ток i_d , поддерживаемый ЭДС самоиндукции, протекает по цепи VD2 – якорь двигателя – VD3 – источник питания. Таким образом, диоды VD2, VD3 образуют контур замыкания тока при его спадании и тем самым исключают перенапряжения на закрытых транзисторах от ЭДС самоиндукции. При изменении направления тока в нагрузке транзисторы VT1 – VT4 как бы меняются местами, а спадающий ток в нагрузке замыкается по цепи VD4 – якорная цепь двигателя – VD1 – источник питания.

В мостовых схемах ШИП, наряду с рассмотренным выше алгоритмом симметричной коммутации, используют различные алгоритмы несимметричной коммутации транзисторов. При наиболее распространенном алгоритме несимметричной коммутации в режиме переключения находятся лишь два из четырех транзисторов – по одному для каждого из направлений протекания тока в нагрузке. Из двух транзисторов, в зависимости от направления тока в нагрузке, один постоянно открыт, а другой закрыт.

Техническая реализация алгоритма симметричной коммутации ключей проще, чем несимметричной, однако здесь, очевидно, требуется большая частота коммутации при одинаковой допустимой амплитуде пульсаций тока в нагрузке. Поскольку частота переключений определяет потери энергии в ключевых элементах схемы, а, следовательно, и их габариты, с точки зрения массогабаритных показателей более предпочтительны алгоритмы коммутации ШИП с знакопостоянным напряжением на выходе. Кроме того, немаловажен также тот факт, что при симметричной коммутации невозможно реализовать режим динамического торможения питаемого от такого ШИП двигателя постоянного тока. [5]

1.4 Обзор драйверов управления двигателями постоянного тока

Требуется подобрать готовый драйвер, позволяющий управлять скоростью и направлением вращения двигателей постоянного тока при использова-

нии внешних источников ШИМ сигнала. Также в драйвере необходимо предусмотреть защиту от перегрузок по току. Имеющиеся двигатели постоянного тока обладают номинальным напряжением питания до 40В, с выходным током 5 А для 1–3, и 2 А для 4–6 степеней соответственно. Согласно требованиям, рассмотрим готовые решения от компаний производителей электроники.

Наиболее часто встречающимся драйвером для управления скоростью и направлением вращения двигателя является драйвер на основе микросхемы L298N совмещенный с силовой частью (рисунок 1.17). При помощи одной платы возможно управлять одновременно двумя двигателями.



Рисунок 1.17 – Драйвер на основе микросхемы L298N совмещенный с силовой частью

Технические характеристики драйвера L298N:

- напряжение питания управляемой части: 5–35 В;
- питание внешней логики (V_{ss}): 5–7 В;
- рабочий выходной ток на канал двигателя: 2 А;
- входное напряжение логической части (V_d): 6–12 В;
- максимальный пиковый ток: 3 А.

Как видно из характеристик, наибольшая нагрузка, которую обеспечивает драйвер, достигает 2 А на каждый двигатель, при 35 В, кроме того драйвер не имеет защиты от перегрузок по току, что по условиям требований не подходит.

Были проанализированы драйверы других конфигураций на основе микросхемы L298N предназначенные для управления более серьезными электродвигателями, например Driver Module H-bridge L298 (рисунок 1.18). Однако они не имеют функции защиты по току и предназначены для двигателей напряжением питания 12–24 В.

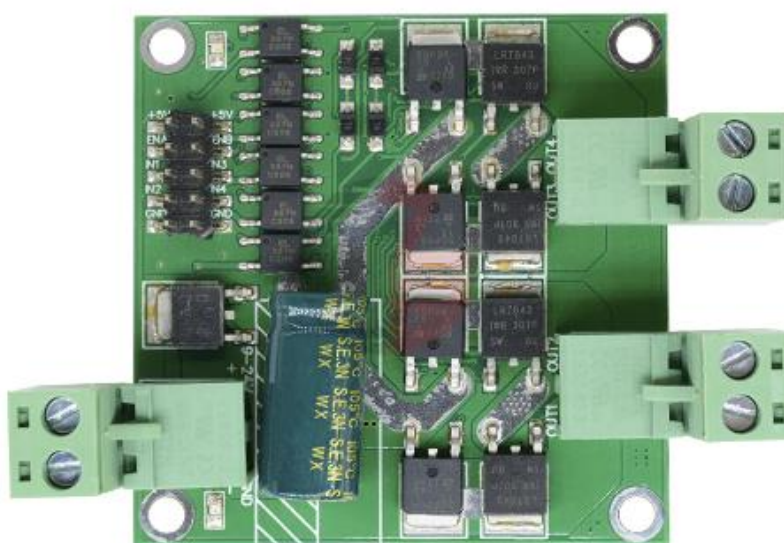


Рисунок 1.18 – Драйвер на основе микросхемы L298N

Фирма Allegro MicroSystems предлагает интегральные двойные микросхемы A4954 (рисунок 1.19) для управления электродвигателями с максимальным напряжением до 40 В. Специальная внутренняя схема синхронного выпрямителя снижает потери мощности при модуляции. Схема имеет встроенную защиту от перегрузок по току, от замыкания выводов двигателя на шины «земли» или питания. Функциональная схема драйвера представлена на рисунке 1.20.

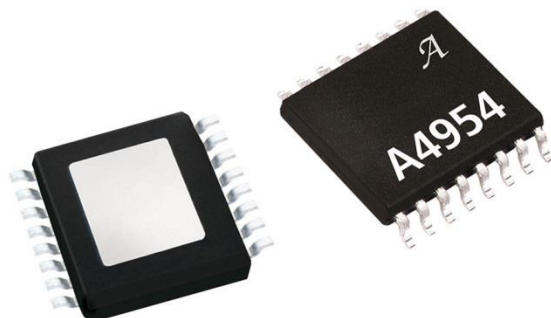


Рисунок 1.19 – Интегральная микросхема A4954

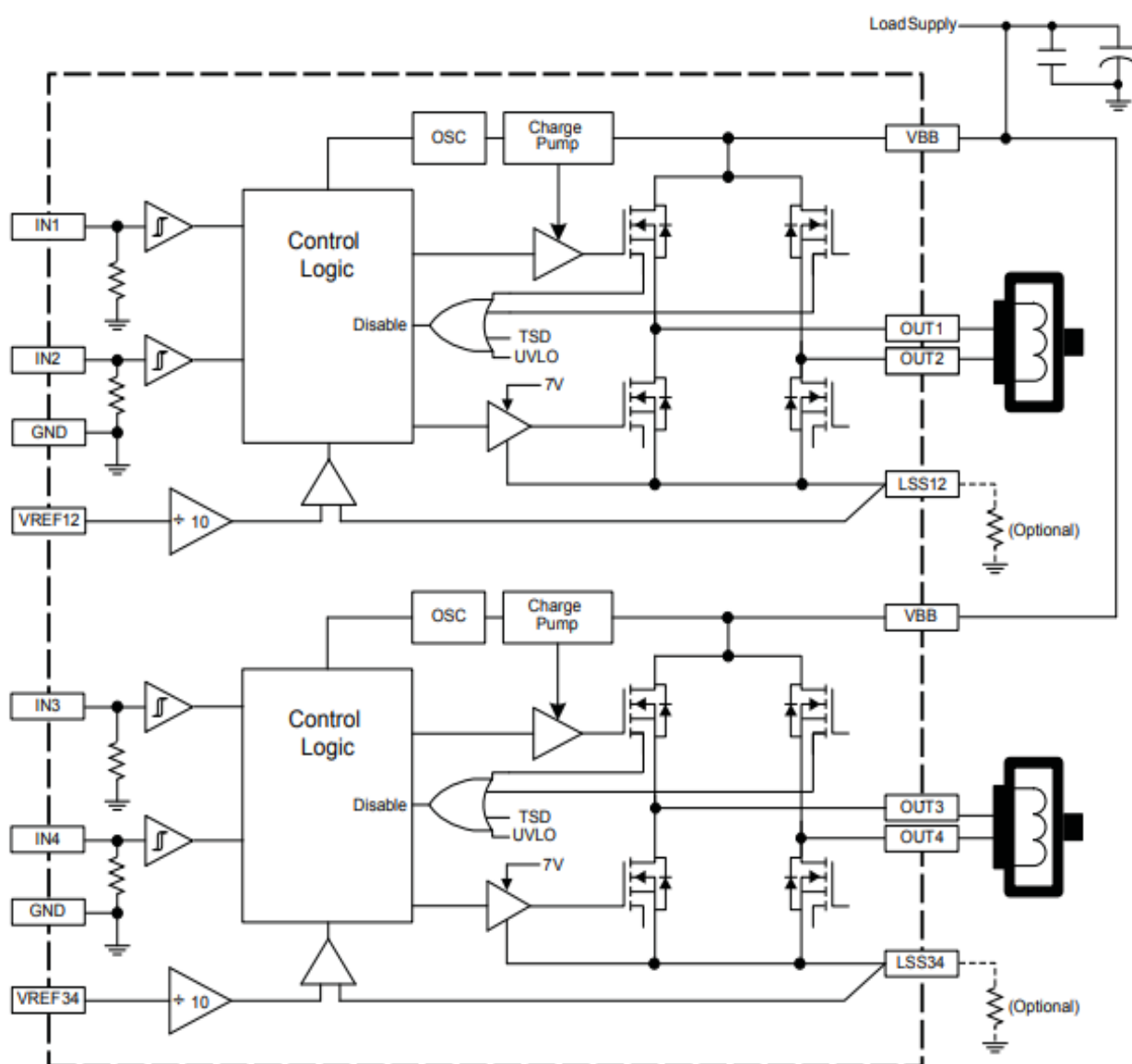


Рисунок 1.20 – Функциональная схема драйвера

Данная микросхема имеет следующие характеристики:

- напряжение питания управляемой части: 40 В;
- рабочий выходной ток на канал двигателя: 2 А.

Как видно, разработанная для ШИМ управления двумя двигателями постоянного тока, микросхема A4954 рассчитана на пиковый ток до 2 А при рабочем напряжении 40 В. Что не достаточно, для имеющихся двигателей робота манипулятора.

Существуют решения для регулирования скорости двигателя, на основе мостовых драйверов управления электродвигателями Arduino проектов (рисунок 1.21).

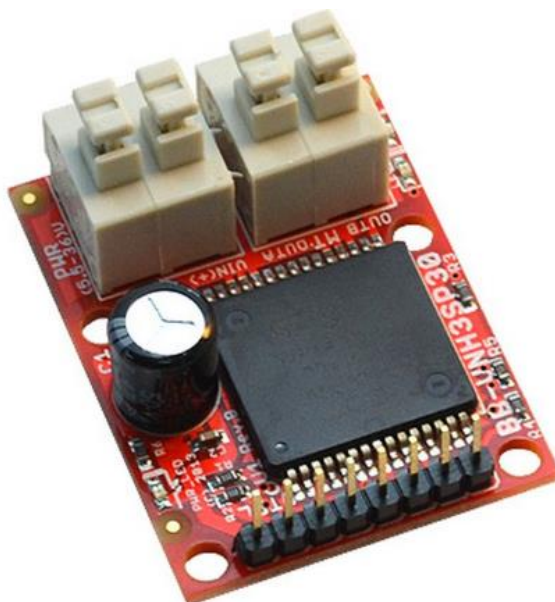


Рисунок 1.21 – Мостовой драйвер BB-VNH3SP30

Драйвер BB-VNH3SP30 представляет собой плату полномостового драйвера VN3SP30 от STMicroelectronics. Плата обеспечивает выходной ток до 30 А при напряжении 36 В. Технические характеристики драйвера VN3SP30:

- напряжение питания 5,5-36 В;
- светодиод направления движения;
- работает с 5 В платами Arduino.

Данная плата не применима к проекту, т.к. драйвер не имеет защиты от перегрузок по току, и обеспечивает питание управляемой части лишь на 36 В при требующихся 40 В.

Проанализировав готовые драйверы от производителей, мы приходим к выводу о том, что нет возможности, применяя готовые драйвера, оставить силовую аппаратуру и систему питания УЧПУ. Были также проанализированы проекты других университетов, связанные с разработкой системы управления для аналогичного робота.[6] Однако в большинстве случаев авторы полностью меняют штатную аппаратуру, что, в конечном счете, отражается на стоимости проекта.

Следовательно, требуется изготовить драйвер самостоятельно, используя уже имеющиеся силовые ключи, входящие в состав плат широтно-импульсных преобразователей.

2. Описание верхнего уровня аппаратной части электропривода манипулятора

Нижний уровень робота манипулятора РМ-01 был представлен модулем процессора привода и модулем управления приводом. При этом верхний уровень решал следующие задачи:

- расчет алгоритмов траектории движения для каждого звена манипулятора, а так же формирование программы движения;
- логическая обработка информации о состоянии устройства, входящих в состав комплекса;
- обеспечение диалогового режима работы оператора с управляющим устройством посредством панели оператора;
- обеспечение режима ручного управления манипулятором посредством пульта управления;
- калибровка местоположения звена манипулятора. [7]

Нижний уровень управления предназначен для решения задачи регулирования параметров движения (положение, скорость) звеньев манипулятора в соответствии с программами движения, формируемым верхним уровнем управления, и представляет собой следящие электроприводы. Кроме того, логический аппарат управления нижним уровнем содержит шесть модулей ШИП для формирования мощных сигналов непосредственного управления электродвигателями.

Как говорилось ранее, в связи отсутствием модулей управления приводами и процессора привода, требуется найти альтернативный способ регулирования параметров движения звеньев манипулятора, а именно, для управления скоростью необходимо реализовать импульсный способ управления для шести двигателей постоянного тока.

Также необходимо обрабатывать сигналы фотоэлектрического датчика, вырабатывающие две последовательности сигналов (каналы А и В), смещенных друг относительно друга на $\pm 90^\circ$ в зависимости от направления движения, и

одну последовательность сигналов (канал index), формируемых по принципу «один импульс за полный оборот датчика». Кроме того, следует организовать прием сигналов по перегрузке по току. Функциональная схема будущей системы управления представлена на рисунке 2.1.

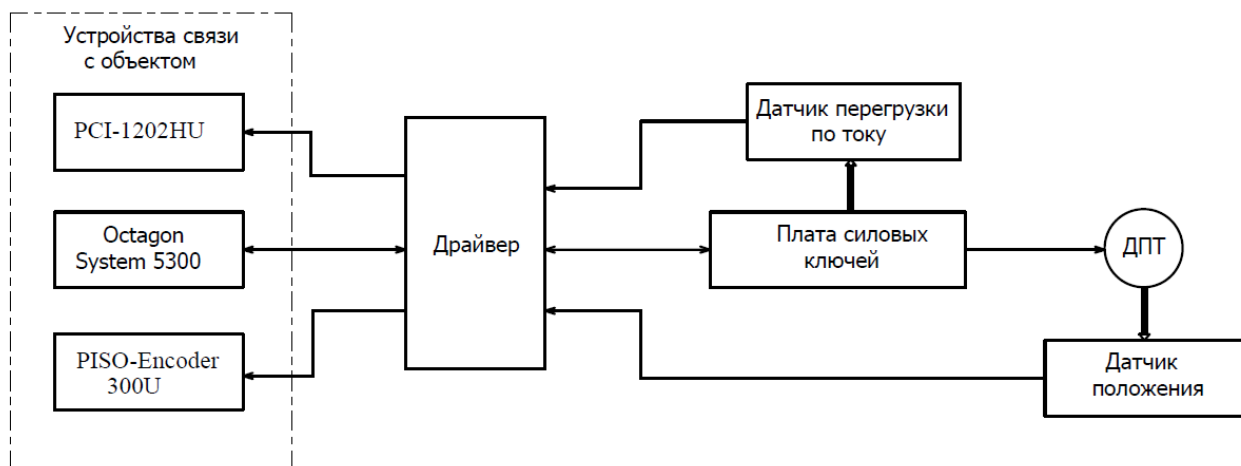


Рисунок 2.1 – Функциональная схема аппаратной части электропривода манипулятора

В качестве формирователя ШИМ, была выбрана плата управления Octagon System 5300 в количестве 2 шт.

Плата PISO-Encoder 300U обеспечит обработку сигналов с энкодера, а PCI-1202HU, в свою очередь, обеспечит прием сигналов по перегрузки по току.

2.1 Формирователь широтно-импульсного модулированного сигнала

Как выше отмечалось, система управления нижнего уровня робота манипулятора имеет плату силовых ключей (рисунок 2.2), который предназначен для преобразования постоянного напряжения питания привода в выходное напряжение, пропорциональное широтно-импульсному модулированному (ШИМ) сигналу.

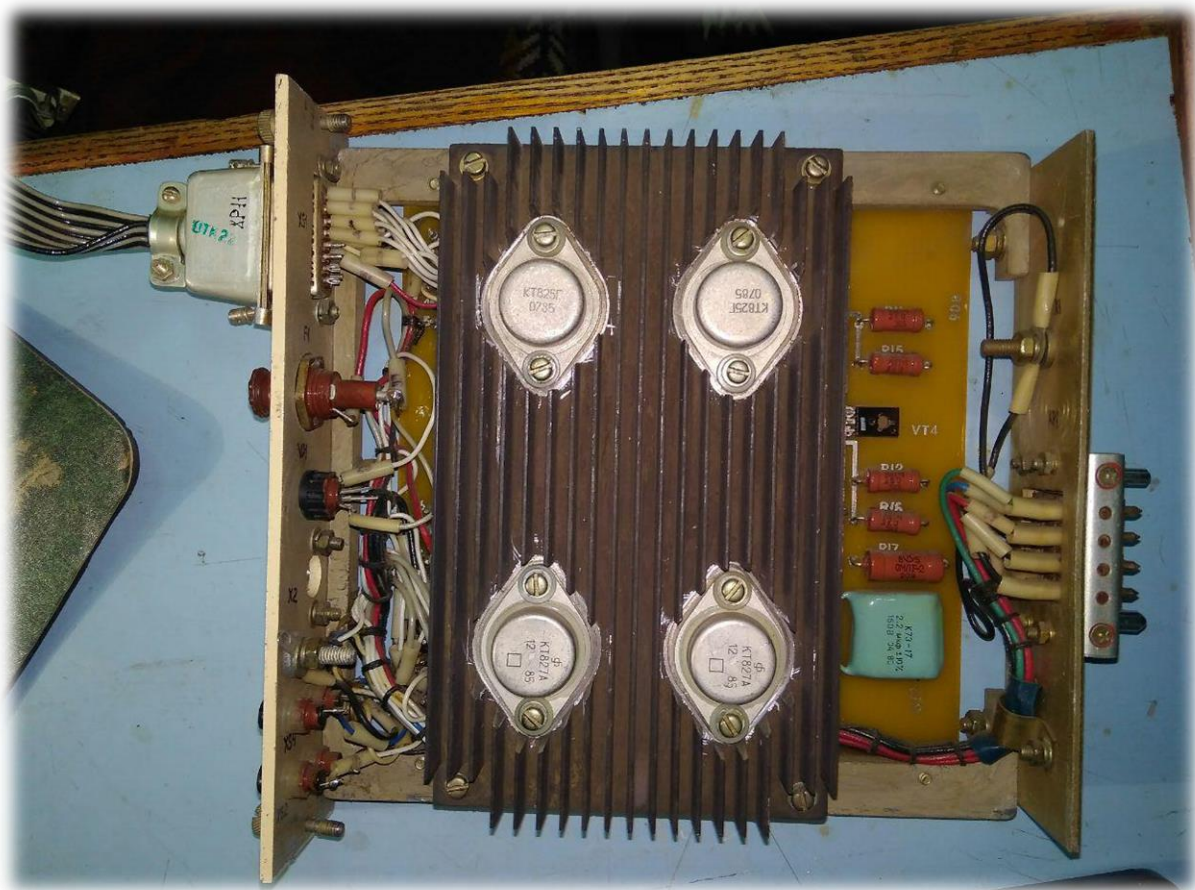


Рисунок 2.2 – Плата силовых ключей для одного звена робота манипулятора

Структура данной платы представлена на рисунке 2.3.

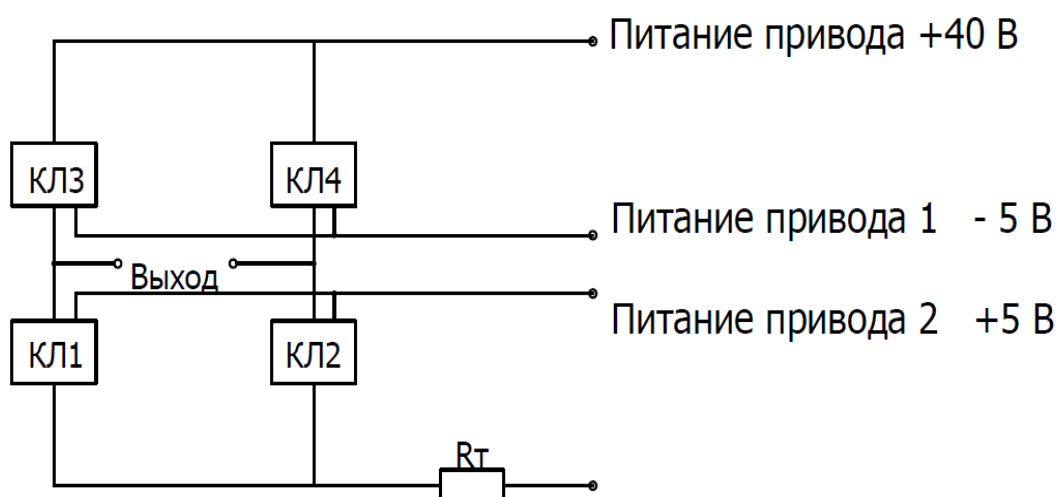


Рисунок 2.3 – Структурная схема ШИП

Как видно из изображения 2.2 , модуль ШИП состоит из четырех транзисторных ключей. Два верхних представляют собой биполярные транзисторы КТ825Г с pnp структурой, а нижние КТ825А имеют pnp структуру. Ранее плата ШИП получала широтно-импульсные модулированные сигналы от модуля управления приводами (МУП). Данное устройство обеспечивало формирование сигналов по четырем каналам КЛ1, КЛ2, КЛ3, КЛ4, для управления силовыми ШИП в соответствии с рисунком 2.4, если привод вращался по часовой, и в соответствии с рисунком 2.5, если вращение обратное. Эта функция, а также функция определения знака ШИМ (т.е. направления вращения), включая режим активных ключей, на текущем проекте реализуются на ISA-плате Octagon System 5300 (рисунок 2.6).

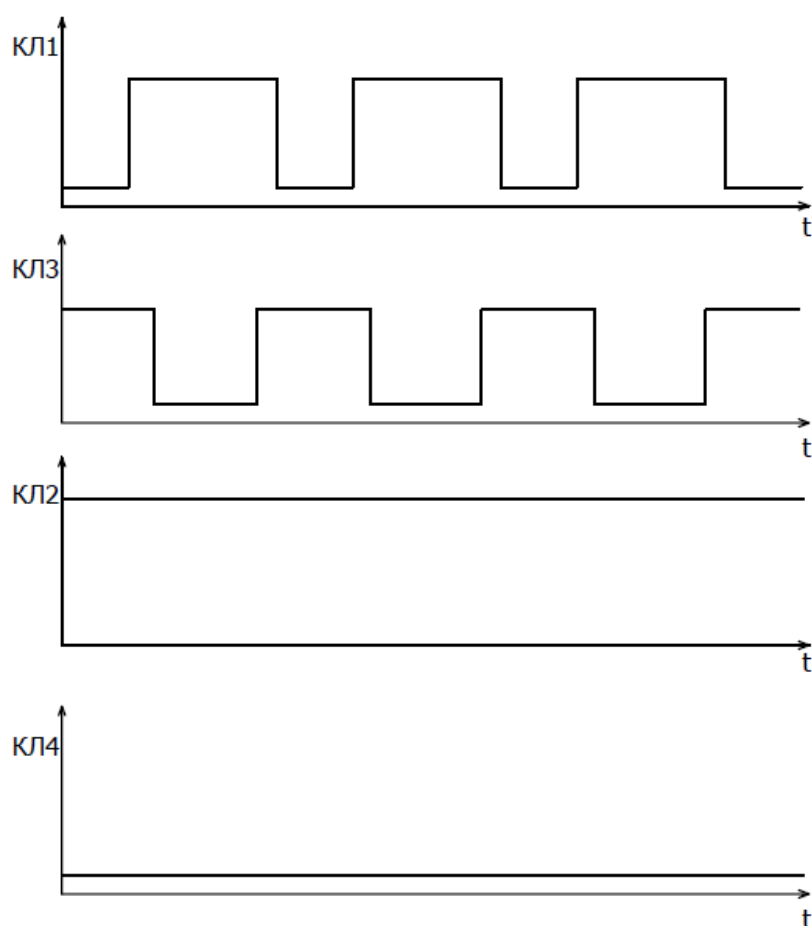


Рисунок 2.4 – Временная диаграмма работы транзисторов мостовой схемы при прямом вращении

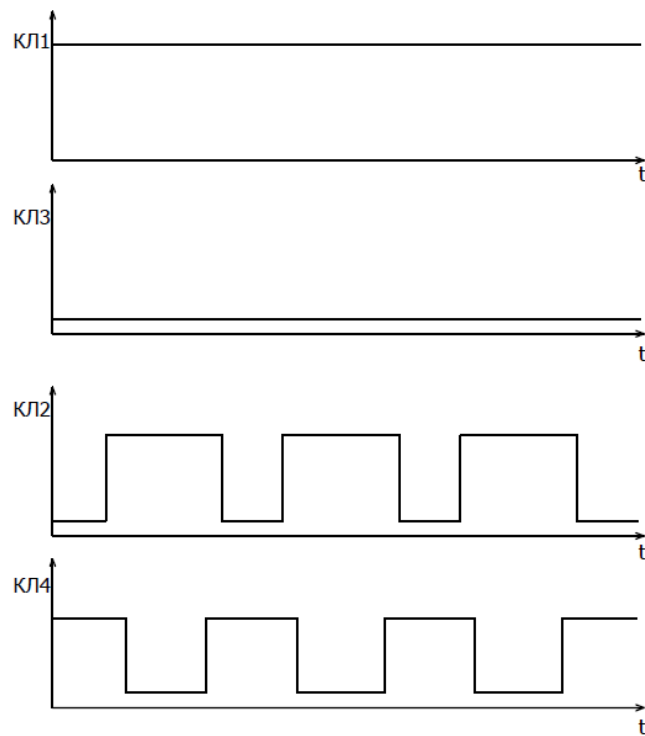


Рисунок 2.5 –Временная диаграмма работы транзисторов мостовой схемы при обратном вращении

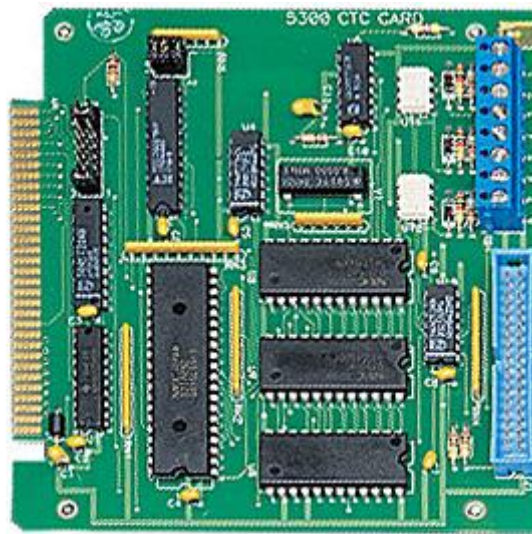


Рисунок 2.6 – PC-совместимый контроллер Octagon System 5300

Octagon System 5300 – представляет собой плату расширения для промышленного компьютера на шине ISA, со следующими характеристиками:

- шесть 16-разрядных счетчиков/таймеров;
- 8 цифровых каналов ввода-вывода;
- программируемые делители частоты;

- оптоизолированные входы;
- диапазон рабочих температур от -40 до +85°C.

Данная плата управления была использована как формирователь импульсов для каждого ШИП звена манипулятора. Рассмотрим формирование для одного канала. Для генерации ШИМ сигнала используется 3 из 9 счетчиков/таймеров платы 5300, процесс происходит в 3 этапа. На первом, используется счетчик CTC3 (Счетчик 3) как простой делитель счетчика в режиме «квадратная волна», создавая квадратный импульс частотой 1МГц. На втором этапе счетчик CTC1.2 определяет выходную частоту. На третьем этапе счетчик CTC1.1 используется в режиме единичного импульса, обеспечивая модулирующий элемент. Аналогичным образом формируются сигналы ШИМ для остальных каналов.

При формировании ШИМ сигнала используются следующие команды:

1) FR – частота, подлежащая модуляции. Эта частота имеет максимальное и минимальное значение. FR может быть любой частоты кратное 1 МГц, то есть в диапазоне от 16 Гц до 500 кГц.

2) FD – Частотный делитель для требуемой частоты. это значение, вычисленное в программе, представляющее собой целое число в диапазоне от 2 до 65 535.

3) DU – Запрошенный рабочий цикл (высокий уровень выходного сигнал) Представляет собой рабочий цикл в процентах (рисунок 2.7).

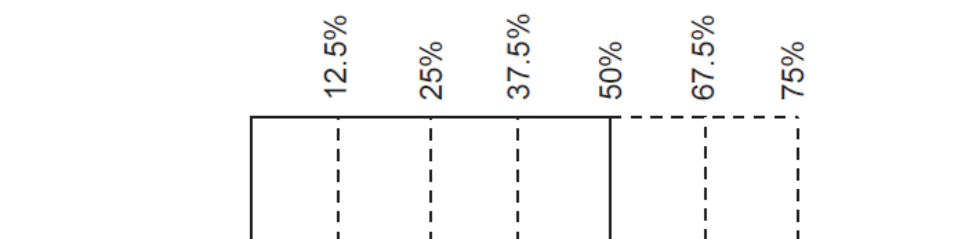


Рисунок 2.7 – Настройка скважности широтно-импульсного сигнала на плате
Octagon System 5300

4) PD – Разделитель ширины импульса. Это значение, вычисляемое программой, представляющее собой целое число в диапазоне от 2 до 65 535.

Чем больше длительность импульса, тем больше будет средний ток, проходящий через двигатель и наоборот, таким образом, происходит регулировка частоты вращения двигателя.

Кроме перечисленных функций, МУП выполняла роль защитного устройства, запирая сигналы управления силовыми ШИП по каналам КЛ1, КЛ2, если напряжение сигнала датчика тока якоря превышала заданную величину напряжения уставки. Данная функция перейдет под контроль платы PCI-1202NU.

2.2 Обработка сигнала энкодеров

В системе управления двигателем имеется фотоимпульсный датчик представленный инкрементальным энкодером, предназначенный для определения скорости и положения звена манипулятора. Необходимо осуществить первичную обработку сигнала, поступающих от фотоимпульсного датчика. С датчика поступает три последовательности импульсов при вращении вала датчика. Первая последовательность импульсов дает один (индексный) импульс на каждый оборот вала датчика и используется при калибровке местоположения звена манипулятора совместно с информацией потенциометрического датчика. Вторая и третья последовательность импульсов имеют одинаковую частоту, но сдвинуты относительно друг друга на $\frac{1}{4}$ периода.

В результате логической обработки импульсов второй и третьей последовательностей, формируются короткие позиционные импульсы учетверённой частоты, которые распределяются на разные выходы, в зависимости от направления вращения вала датчика (рисунок 2.8).

В данном проекте, сигналы фотоэлектрического датчика (каналы А, В и INDEX), информация от которого передается в виде импульсного сигнала, будут обрабатываться, предварительно усиленные драйвером, платой управления движением PISO-Encoder300U (рисунок 2.9).

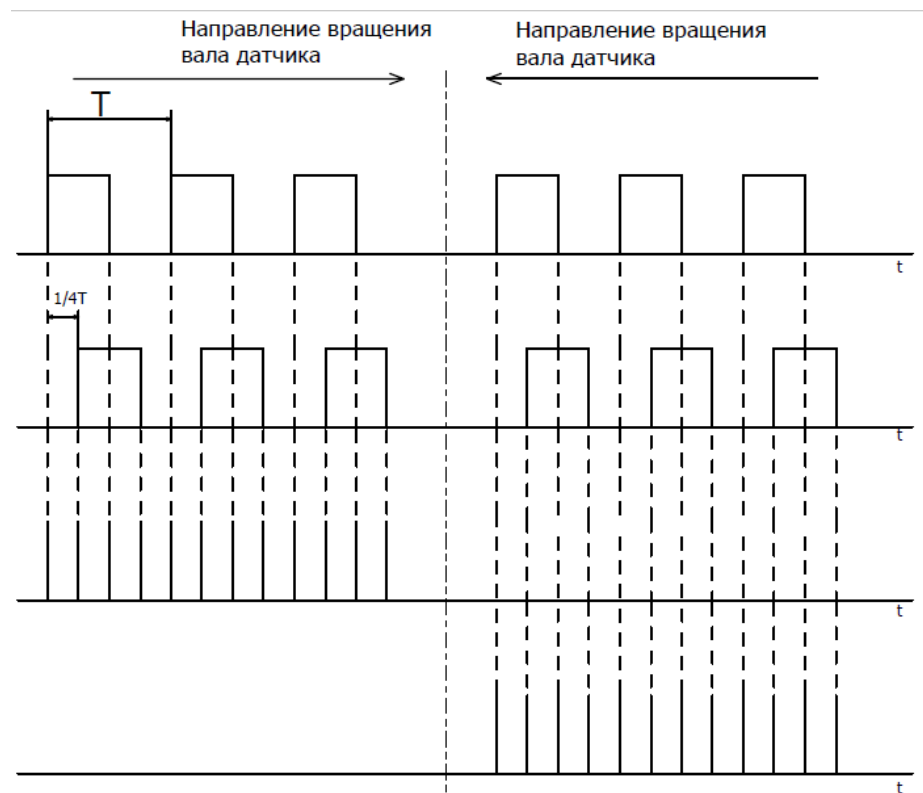


Рисунок 2.8 – Диаграмма импульсов формирователя позиционных импульсов



Рисунок 2.9 – Плата управления движением PISO-Encoder300U

PISO-Encoder300U представляет собой плату на PCI шине, которая имеет следующие характеристики:

- каналов измерения импульса/частоты: 6;
- тип сигнала: CW/CCW, Pulse/Dir, Quadrant;
- разрядность счетчика: 32 Бит;
- максимальная частота: 1 МГц.

3. Разработка драйвера для силового преобразователя двигателей постоянного тока.

Для согласования верхнего уровня робота манипулятора (Octagon System 5300) и нижнего (ШИП), требуется разработать драйвер. Как уже отмечалось, двигатель постоянного тока управляется по диагоналям мостовой схемы, как показано на рисунке 3.1. Дело в том, что при смене направления вращения, из-за того, что двигатель имеет характер активно-индуктивной нагрузки, ток не может мгновенно опуститься до нуля, это может привести короткому замыканию.

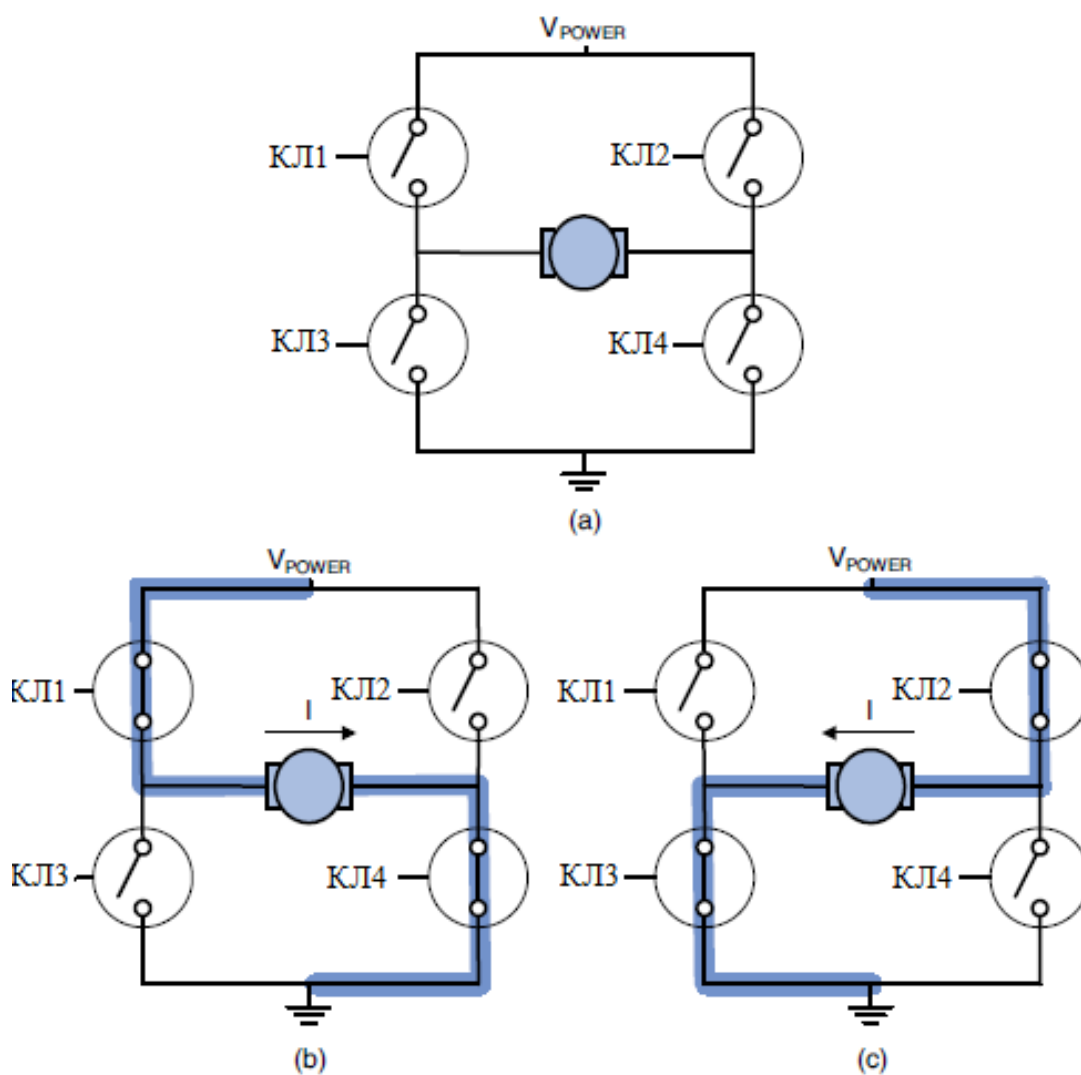


Рисунок 3.1 – Управление направлением вращения двигателя по мостовой схеме

Для решения данной проблемы необходимо организовать временные задержки (рисунок 3.2), т.е. задерживать ШИМ сигнал на некоторый промежуток времени, чтобы гарантировать закрытие одной пары транзисторов при смене направления вращения двигателя.

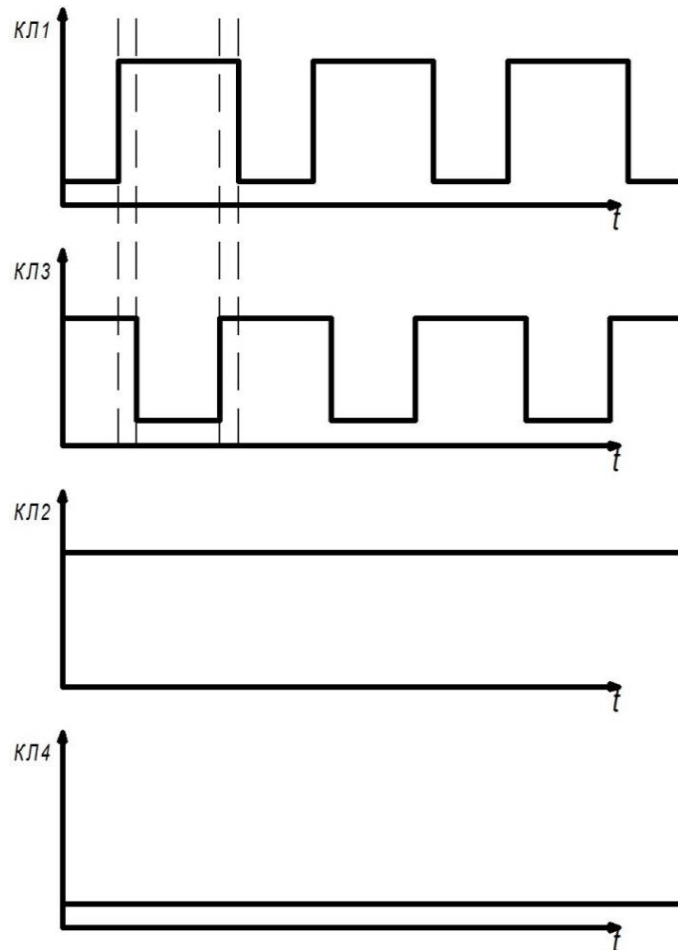


Рисунок 3.2 – Организация временных задержек

Таким образом, на драйвер будут возложены следующие функции:

- защита от сквозных токов;
- учет знака ШИМ;
- защита от перегрузок по току;
- активация режима активных ключей;
- усиление ШИМ сигнала.

3.1 Постановка задачи

В третьем семестре производственной практики был разработан драйвер управления двигателями постоянного тока на цифровых устройствах, который решал перечисленные задачи. На рисунке 3.1 представлена электрическая принципиальная схема, данного драйвера, для одной степени подвижности робота. В таблице 3.1 представлен перечень используемых элементов данной схемы.

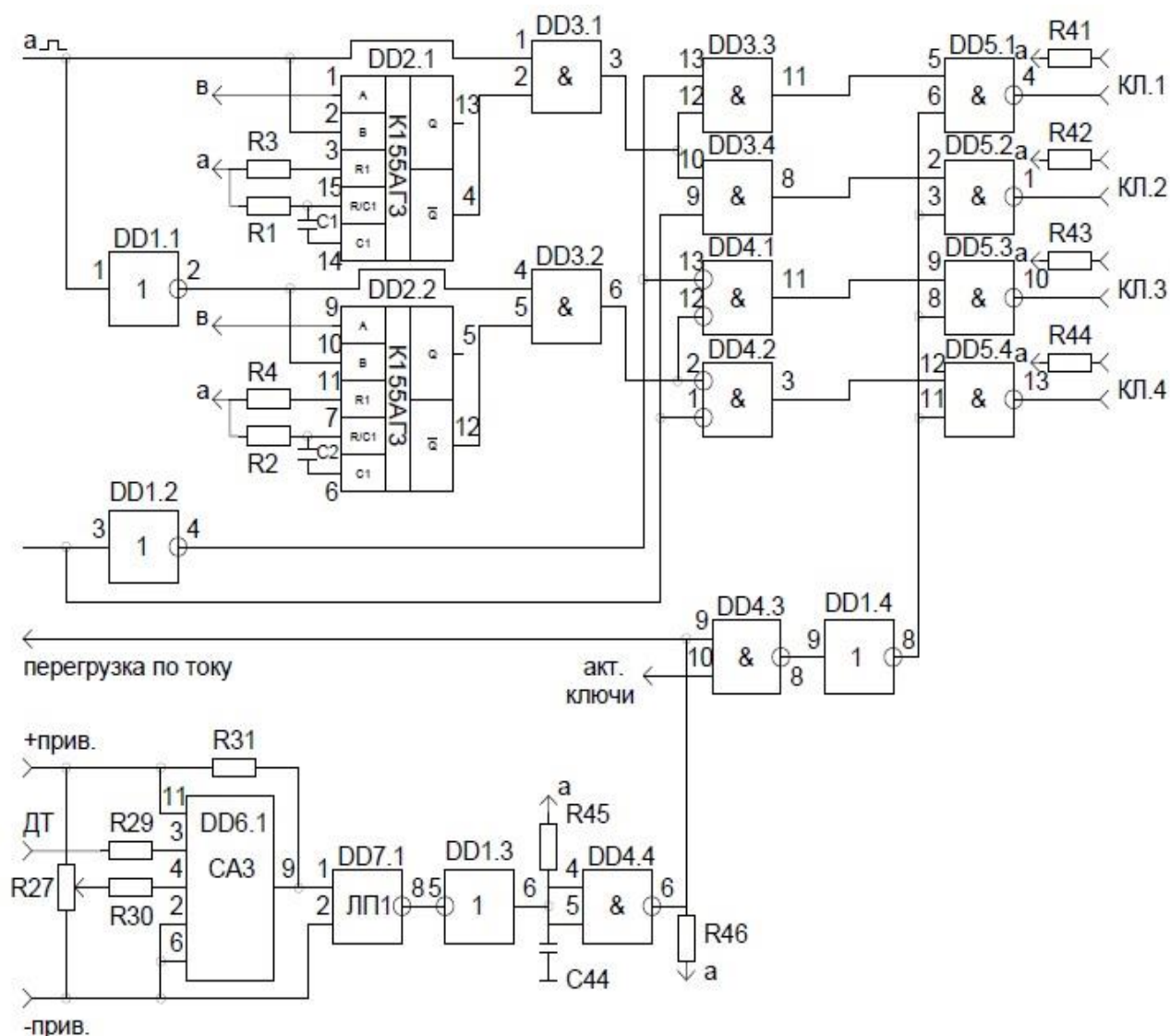


Рисунок 3.1 – Электрическая принципиальная схема для одной степени подвижности

Таблица 3.1 – Перечень используемых элементов

Обозначение	Наименование
D1	K155ЛН1 – 6 логических НЕ элементов
D2	K155АГ3 – сдвоенный одновибратор
D3	K155ЛИ1 – 4 логических 2И элемента
D4	K155ЛА3 – 4 логических 2И-НЕ элемента
D5	K155ЛА8 – 4 логических 2И-НЕ элемента
D6	K554СА3 – компаратор напряжения
D7	K293ЛП1 – оптронный переключатель

На вход системы поступают ШИМ сигналы от платы 5300, которые в результате преобразования, управляют соответствующими ключами в цепи якоря двигателя. Также на схеме реализована токовая защита.

Схема выполняет следующие задачи:

- задерживает ШИМ-сигнал для защиты от сквозных токов в силовых преобразователях, временная задержка выполняется микросхемой K155АГ3А (длительность выходного импульса одновибратора определяется элементами R1, R2, R3, R4, C1 и C2);
- учёт знака ШИМ реализуется элементами ЛИ1 и ЛА3;
- микросхема ЛА8 используется для усиления выходного сигнала и обеспечивает запирающие сигналы управления силовыми ШИП, если напряжение сигнала датчика тока якоря двигателя превышает заданную величину напряжения уставки;
- токовая защита реализуется с помощью компаратора с малым входным током K554СА3А и гальванической развязки силовой и слаботочной частей привода с помощью оптоизолятора с цифровым ТТЛ-выходом K293ЛП1А. Для фильтрации шумов используется RC-цепочка (элементы R45 и C44).

Рассматриваемая схема реализована для одного сочленения манипулятора. Выполнена проверка работоспособности одного канала драйвера путём про-

ведения опытных испытаний. При подключении и отладки драйвера возникли трудности, связанные с надежностью, громоздкостью собранной платы управления, поэтому было принято решение перенести реализованную систему управления на программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Реализация схемы на ПЛИС имеет следующие преимущества:

- уменьшает цену конечного решения, так как вместо использования большого числа элементов применяется единственная микросхема;
- уменьшение количества дискретных схем и соединяющих их проводов повышает надёжность изделия;
- уменьшение габаритов изделия;
- улучшаются временные характеристики;
- повышается гибкость системы, так как ПЛИС можно перепрограммировать.

Несмотря на все преимущества ПЛИС, на их базе можно реализовать только цифровые цепи. В предполагаемом варианте схеме на плате расширения планируется разместить ПЛИС и к её выводам подключать все аналоговые элементы; Таким образом, на ПЛИС будет реализована логическая схема драйвера, а все аналоговые устройства будут подключаться к ней (за исключением резисторов и конденсаторов, которые образуют RC-цепочки задающие временные характеристики – задержки и длительности выходных импульсов схем).

На сегодняшний день можно выделить несколько мировых лидеров в производстве ПЛИС; такие фирмы как Xilinx, Altera, Atmel и др. Каждая фирма предлагает свои САПР для работы с ПЛИС. Так, например, фирма Altera предлагает программное средство разработки Quartus II, которое будет использовано нами в дальнейшем.

В системе управления двигателем имеется фотоимпульсный датчик представленный инкрементальным энкодером, предназначенный для определения скорости и положения звена манипулятора. Под влиянием сопротивления и индуктивности проводов схемы сигнал, приходящий от энкодера, ослабленный.

Для формирования цифрового сигнала и при согласовании интерфейса УСО с каналом энкодера используется микросхема КР1006ВИ1 (рисунок 3.2).

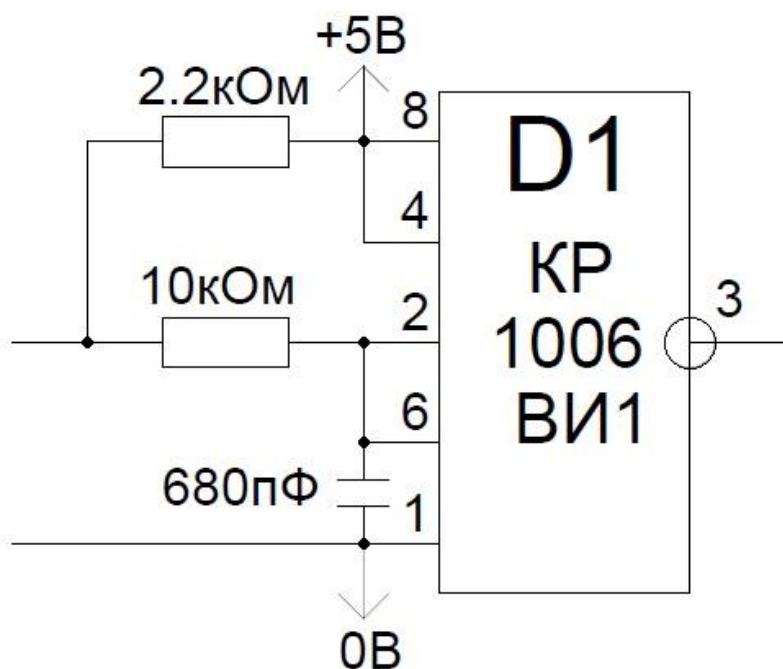


Рисунок 3.2 – Канал энкодера

Таким образом, конечной целью разработки является перенесение цифровой схемы драйвера и усилителя сигнала энкодера на ПЛИС фирмы Altera, с использованием САПР Quartus II.

3.2 Описание программного пакета Quartus II

Программный пакет Quartus II фирмы Altera представляет собой полную, много платформенную среду проектирования, легко адаптируемую к требованиям конкретного проекта. Это комплексная среда для разработки систем на программируемом кристалле (SOPC). Пакет Quartus II включает в себя все утилиты, необходимые для работы с микросхемами FPGA и CPLD. На рисунке 3.3 показаны основные этапы проектирования в среде Quartus II [3].



Рис. 3.3 – Общая структурная схема проектирования в Quartus II

Следующая последовательность действий описывает типичный порядок проектирования в среде Quartus II с помощью графического интерфейса пользователя [8]:

1. Создание нового проекта, указание типа используемой микросхемы или семейства с помощью утилиты New Project Wizard.
2. Создание исходного файла проекта на языках Verilog HDL, VHDL, или Altera Hardware Description Language (AHDL) с помощью текстового редактора (Text Editor). Кроме того, можно создать блок-схему проекта в графическом редакторе (Block Editor) используя символы, представляющие другие исходные файлы проекта или логические элементы. С помощью команды IP Catalog можно создавать различные варианты мегафункций и IP-ядер для включения их в файл проекта.
3. Указание начальных настроек проекта с помощью редактора назначений (Assignment Editor).

4. Создание проекта на системном уровне с помощью генератора систем на кристалле (SOPC Builder) или генератора систем ЦОС (DSP Builder).
5. Создание программных файлов для процессорного ядра Nios с помощью редактора программного обеспечения (Software Builder).
6. Синтез проекта с помощью модуля анализа и синтеза (Analysis & Synthesis).
7. Выполнение функционального моделирования проекта с помощью симулятора (Simulator) и команды Generate Functional Simulation Netlist.
8. Выполнение размещения и трассировки проекта с помощью модуля трассировки (Fitter).
9. Проведение предварительного анализа потребляемой мощности с помощью программы Power Play Power Analyzer.
10. Проведение анализа временных задержек проекта с помощью программы анализатора временных задержек (TimeQuest Timing Analyzer).
11. Выполнение моделирования проекта с учетом временных задержек с помощью симулятора.
12. Улучшение временных характеристик проекта с помощью повторного физического синтеза, использования фиксированных логических блоков, настроек в диалоговом окне Settings и в редакторе назначений.
13. Создание файла для программирования микросхемы с помощью модуля ассемблера (Assembler).
14. Программирование микросхемы с помощью утилиты программатора (Programmer) и оборудования Altera; или преобразование формата файла для программирования.
15. Отладка проекта с помощью встраиваемого логического анализатора (SignalTap II Logic Analyzer), генератора контрольных точек (SignalProbe).

Основной рабочей единицей в среде Quartus II является проект. Он создается с помощью специальной утилиты (New Project Wizard). При создании нового проекта задается рабочая директория, назначается имя проекта и имя фай-

ла верхнего уровня иерархии. Дополнительно можно указать исходные файлы проекта, пользовательские библиотеки, используемые САПР сторонних фирм, выбранное семейство микросхем.

3.3 Построение схем с использованием графического редактора

Создадим новый проект в пакете Quartus; выберем директорию расположения проекта, его имя и файл верхнего уровня (рисунок 3.4). Рекомендуется для каждого нового проекта выделять отдельную директорию, так как каждый проект содержит в себе большое количество файлов. Каждый проект Quartus может включать в себя несколько модулей, описывающих различные функциональные блоки проектируемой схемы; среди этих модулей выделяют главный, так называемый файл верхнего уровня, в котором описана взаимосвязь между всеми блоками схемы. Только данная информация является абсолютно обязательной для создания нового проекта, все остальные параметры можно настроить в любое время из главного меню программы [4-7].

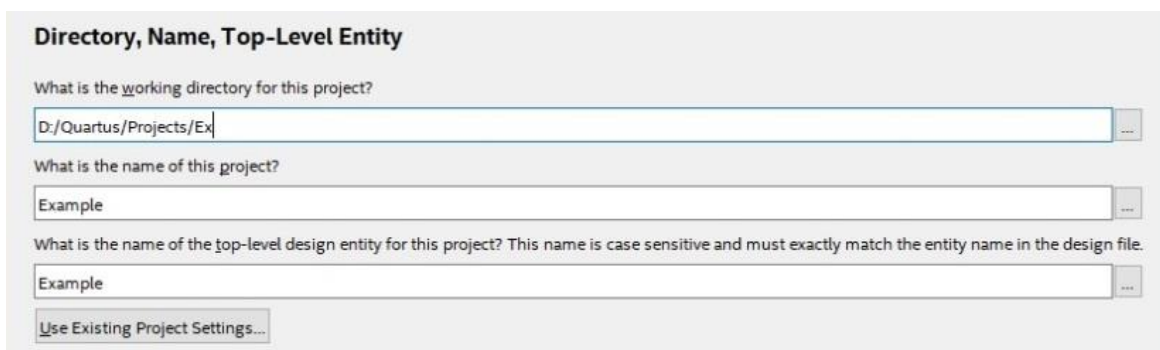


Рисунок 3.4 – Основные данные проекта

Ещё одним важным этапом создания проекта является выбор модели программируемой микросхемы (рисунок 3.5). В нашем проекте используется ПЛИС семейства MAX II, модель EPM570T100I5.

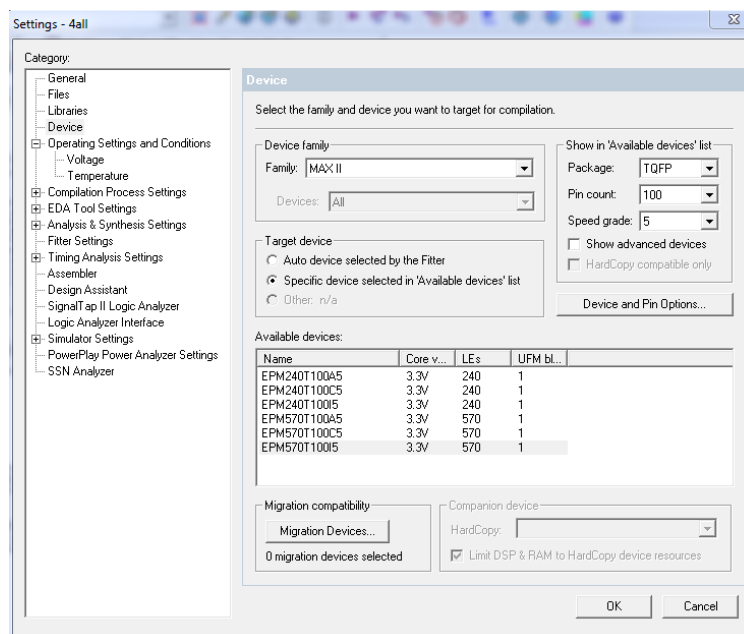


Рисунок 3.5 – Окно выбора модели ПЛИС

С помощью «Device and Pin Options...» вызывается окно «Device and Pin Options» (рисунок 3.6), в котором перечисляются параметры проекта относящиеся к микросхеме ПЛИС.

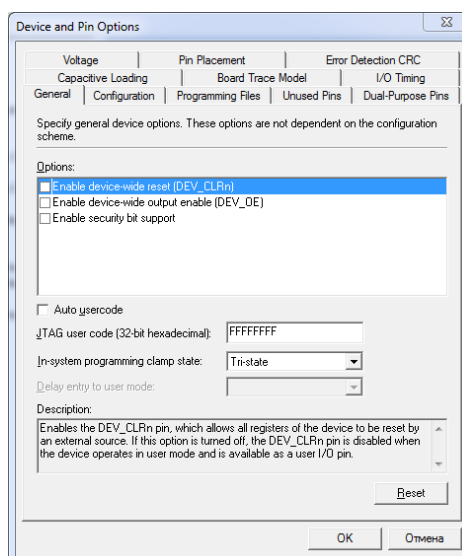


Рисунок 3.6 – Окно Device and Pin Options

В этом окне есть вкладка «Unused pins» (рисунок 3.7), в котором производится настройка состояния неиспользуемых контактов. Здесь следует установить параметр «Reserve all unused pins» в состояние «As input tri-stated». Это означает, что все незадействованные в проекте контакты будут подключены в

высокоимпендансное (High-Z) состояние. В таком состоянии выводы практически полностью отключаются от внешних цепей, как если бы они не были подключены к ним физически.

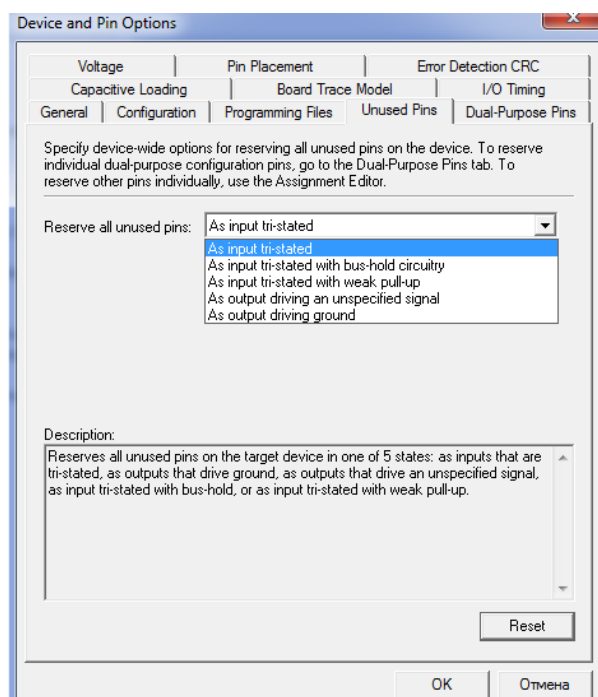


Рисунок 3.7 – вкладка «Unused pins»

Далее были спроектированы временные задержки (рисунок 3.8) на языке описания аппаратуры интегральных схем (VHDL от англ. VHSIC (Very high speed integrated circuits) Hardware Description Language) листинг кода которой приводится в Приложении 1

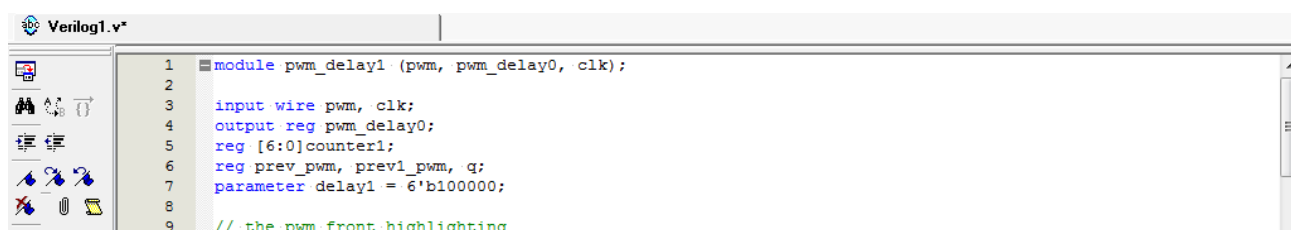


Рисунок 3.8 – Код файла временных задержек

Был создан символьный файл (рисунок 3.9) из проекта временных задержек, для экспорта в Block Diagram/Schematic File, поскольку в больших проектах удобно, чтобы главным был файл схемотехнического описания.

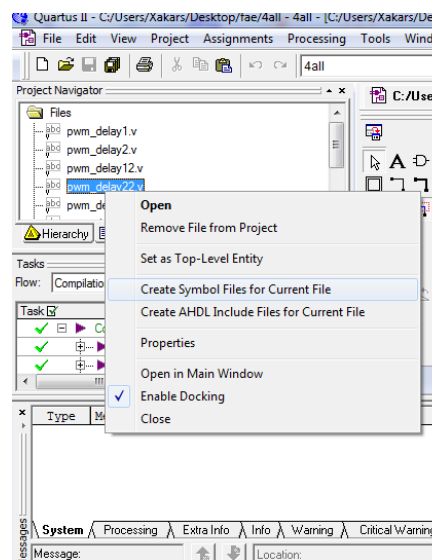


Рисунок 3.9 – Создание символьного файла

Для создания файла схематехнического описания необходимо выбрать File → New и выбрать из списка Block Diagram/Schematic File (рисунок 3.10)

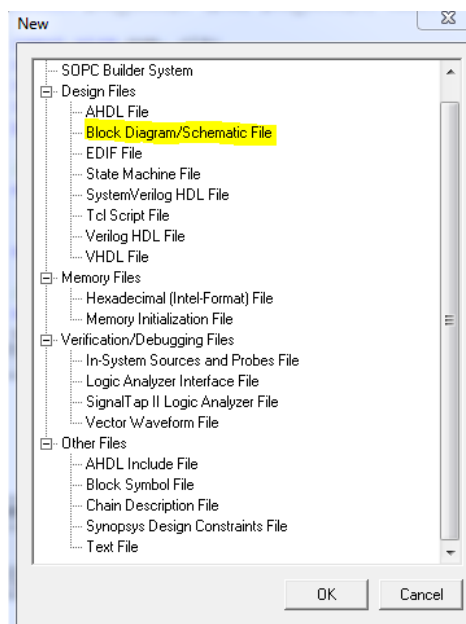


Рисунок 3.10 – Создание Block Diagram/Schematic File

С помощью набора инструментов Block Diagram/Schematic File был собран драйвер управления (рисунок 3.11) для одного канала сочленения манипулятора.

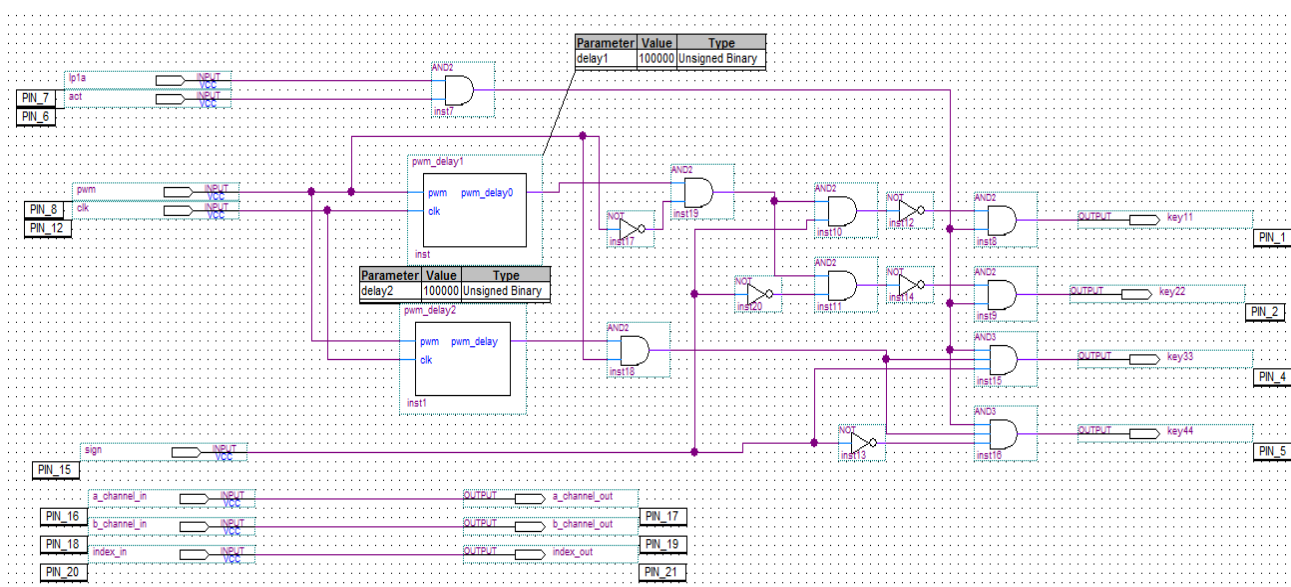


Рисунок 3.11 – Драйвер управления для одного канала на ПЛИС

3.4 Привязка входов и выходов схемы к выводам ПЛИС

В работе требовалось размножить один отлаженный канал управления ДПТ до требуемых шести, но в ходе планирования выяснилось, что на ПЛИС, модели EPM570T100I5, возможно разместить только четыре. Далее рассматривается привязка 4 каналов управления к данной микросхеме.

Для назначения узлам определенных выводов микросхемы, и задания некоторых других настроек удобно использовать «Pin Planner» (проектировщик выводов). Планировщик выводов представлен на рисунке 3.13. Этот инструмент удобен тем, что мы видим непосредственно саму микросхему и все недоступные и доступные пользователю выводы, причем двойным щелчком по выводу можно вызвать диалоговое окно для закрепления за этим выводом определенного узла, и назначения на работу с требуемым стандартом напряжения (по умолчанию устанавливается стандарт 3.3-V). Если, например, порт работает как вход, то возможно использование триггера Шмитта для подавления шума дребезга (рисунок 3.14). Выводы ПЛИС в основном окне Pin Planner имеют разные условные обозначения, в зависимости от их функциональной принадлежности. Все возможные условные обозначения представлены на рисунке 3.12.

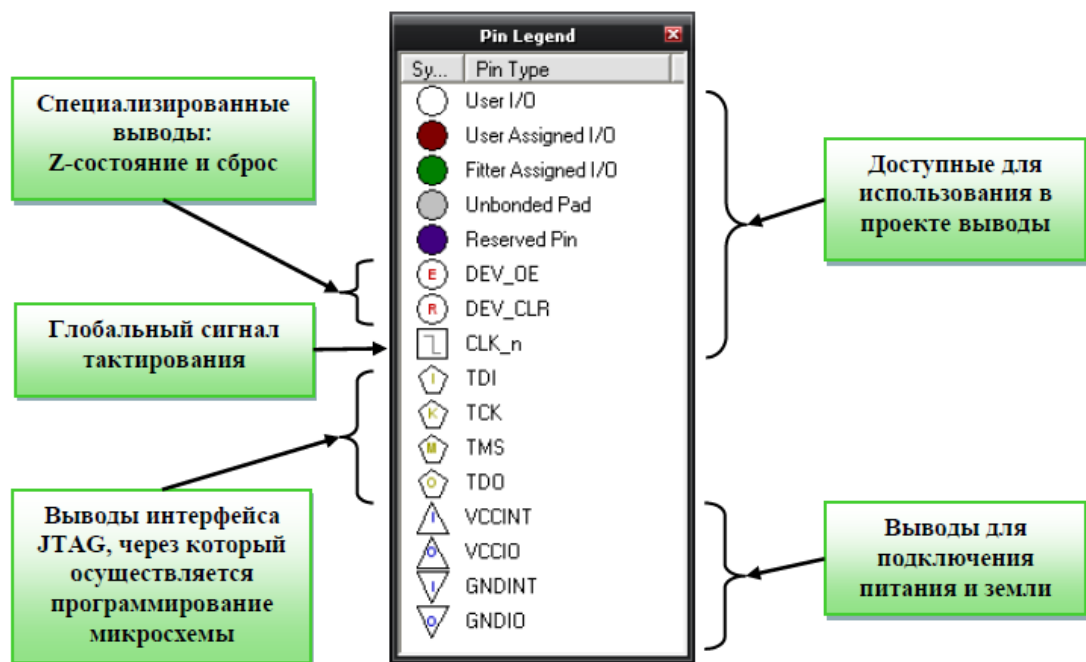


Рисунок 3.12 – Условное обозначение выводов микросхемы

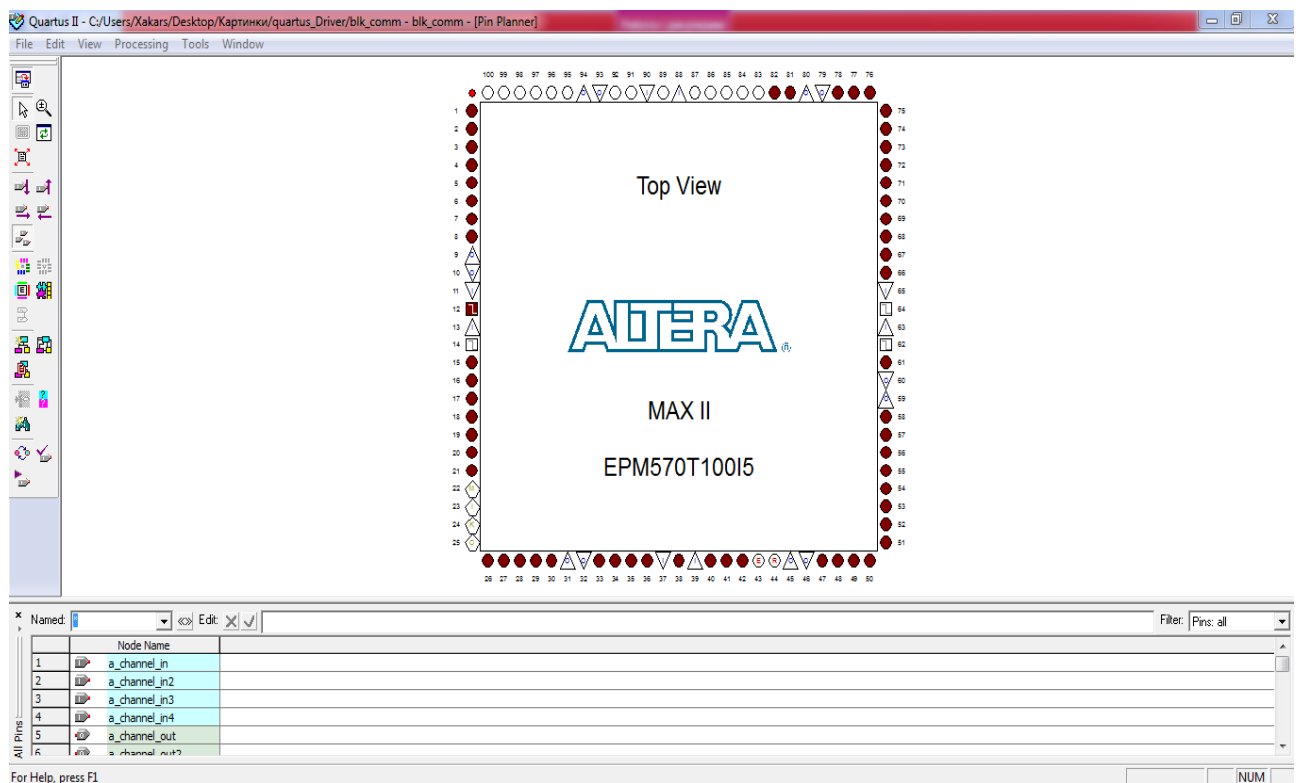


Рисунок 3.13 – Окно Pin Planner

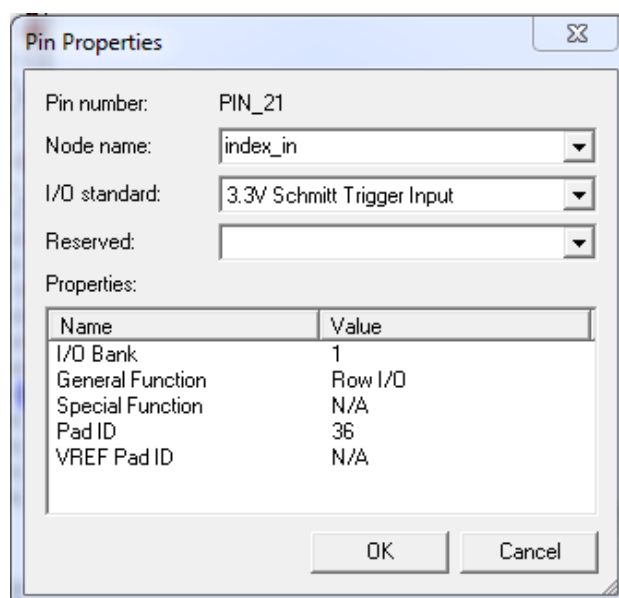


Рисунок 3.14 – Окно настройки пина

В ходе работы были привязаны входы и выходы схемы к выводам ПЛИС, результаты приведены в Приложении Б.

4 Специальные вопросы обеспечения безопасности

При проектировании системы управления электроприводом манипулятора необходимо руководствоваться следующими стандартами и правилами для обеспечения безопасности деятельности:

- ГОСТ;
- стандарты качества электроэнергии;
- программы испытаний разрабатываемого устройства;
- стандартами защит устройства.

Для последующей разработки исследуемой системы следует отдельно рассмотреть следующие аспекты безопасности при проведении опытно-конструкторских работ:

- функциональной;
- электромагнитной совместимости;
- обеспечения электробезопасности;
- степени защиты.

4.1 Функциональная безопасность

Вопросы функциональной безопасности регламентируются государственной серией стандартов ГОСТ Р МЭК 61508.

Этот ГОСТ охватывает проблемы безопасности связанные с уровнем стандартизации проектируемых изделий. В качестве одного из показателей оценки надежности будущей системы будет определение уровня полноты безопасности (далее УПБ).

УПБ – это показатель устойчивой работы проектируемой системы.

Однако для начала необходимо определить жизненный цикл системы безопасности, который является системным подходом при определении устойчивого показателя (см. Рис. 4.1).

Для нашей системы управления необходимо определить шесть критериев безопасной работы. И для того, чтобы перейти к определению уровня безопасности, обозначим опасности при эксплуатации проектируемой системы.

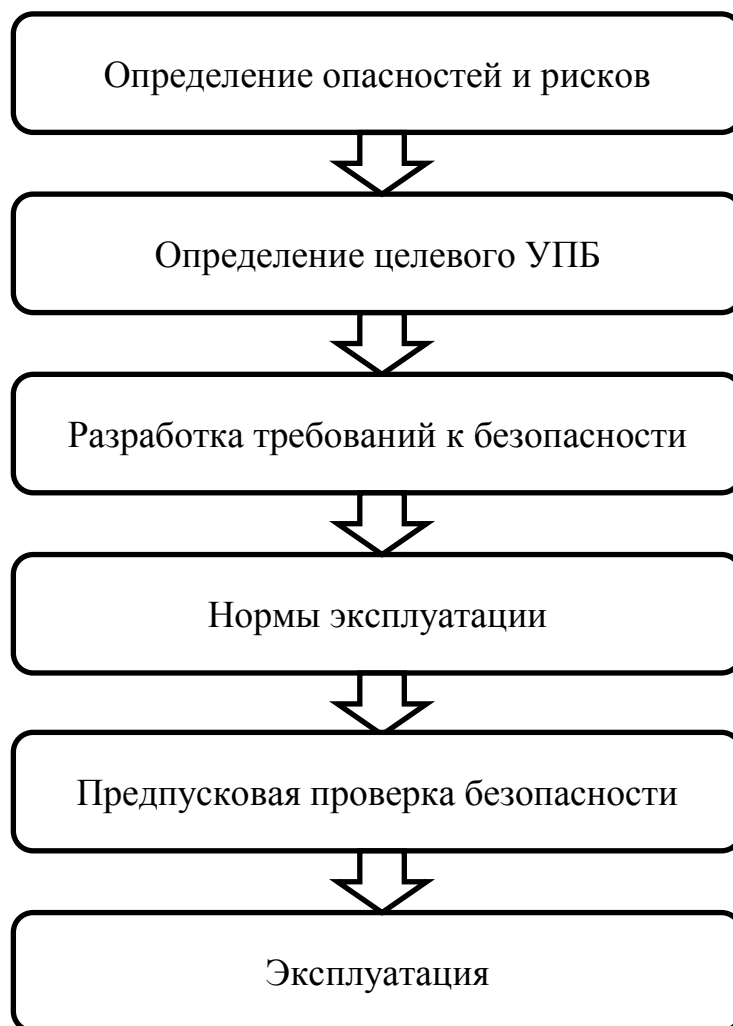


Рисунок 4.1. Жизненный цикл обеспечения безопасности системы управления электроприводом манипулятора

Главные риски работы электропривода манипулятора будут:

- вероятность опрокидывания робота;
- выход из строя отдельных частей системы;
- ограниченная грузоподъемность.

Существует четыре уровня полноты безопасности, каждый из которых показывает допустимую долю отказов для конкретной проектируемой системы.

Для того чтобы верно присвоить проектируемому устройству, системе управления электроприводом манипулятора, УПБ необходимо также определить такой показатель, как отказоустойчивость.

Данная характеристика системы отражает способность устройства продолжать работать при возникновении эксплуатационных неисправностях.

Таблица 4.1 – Таблица показателя отказов (согласно МЭК 61508)

Тип В (сложные устройства)			
Доля безопасных отказов	Отказы		
	0	1	2
< 60%	Нет	УПБ 1	УПБ 2
60% до < 90%	УПБ 1	УПБ 2	УПБ 3
90% до < 99%	УПБ 2	УПБ 3	УПБ 4
≥ 99%	УПБ 3	УПБ 4	УПБ 4

Исходя из приведенной таблицы 4.1, можно приблизительно определить, что полнота безопасности будет второго уровня.

Для более детального понимания каждого уровня необходимо проанализировать таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Связанные показатели в УПБ

УПБ	Средняя вероятность отказа по требованию	Последствия
1	10^{-5} до $< 10^{-4}$	Вероятность несчастного случая: региональная, городская
2	10^{-4} до $< 10^{-3}$	Вероятность несчастного случая: производственная (массовая)
3	10^{-3} до $< 10^{-2}$	Вероятность несчастного случая: производственная (одиночная)
4	10^{-2} до $< 10^{-1}$	Вероятность несчастного случая: легкая одиночная

Так как система управления проектируется для промышленного робота, то исходя из таблицы 4.2, уровень 2 выбран, верно.

Для полного освещения функциональной безопасности системы необходимо составить перечень отказов.

Одним из показателей отказа будет вероятность отказа по требованию. Полный перечень отказов представлен на рисунке 4.2.

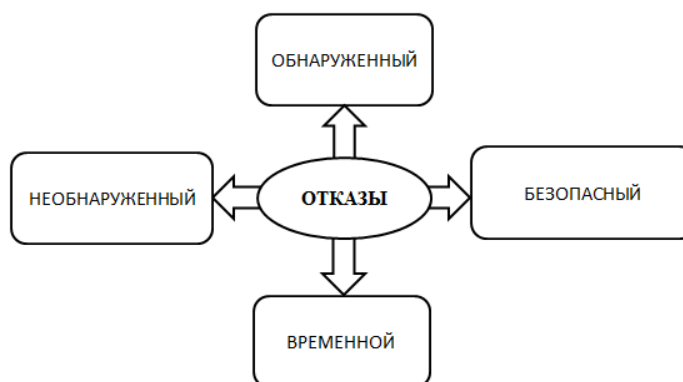


Рисунок 4.2. Перечень отказов системы управления электроприводом манипулятора

Эффективность УПБ определяется из вероятности, что система сможет выполнить все свои функциональные назначения при получении запроса на работу.

4.2 Электромагнитная совместимость

В конструкциях большинства робототехнических устройств применяются электрические устройства, которые излучают электромагнитные помехи. Они возникают с различными электрическими характеристиками, которые могут воздействовать на устройства как внутри робототехнического комплекса, так и внешне.

Поэтому данный аспект охватывает степень влияния этих помех на работу системы в целом.

Согласно ГОСТ, электромагнитной совместимостью является способность отдельных блоков машины нормально функционировать в окружении допустимого количества помех, при этом, не осложняя работу других устройств.

Для любого объекта электротехники комплекс мер по обеспечению электромагнитной совместимости будет включать несколько этапов.

Для начала необходимо провести первичное обследование объекта. Далее идет проектирование устройства с учетом электромагнитной совместимости, рассчитывается молниезащита.

При введении в эксплуатацию оборудования проводят дополнительный комплекс мероприятий по диагностике электромагнитной обстановке:

- плановую (1 раз в 10 лет);
- внеплановую (при нарушениях работы устройства).

Чтобы проектируемый объект правильно выполнял свои задачи необходимо составить программу испытаний (см Таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Общие положения программы испытаний

Необходимые уточнения	Дополнение
Документы регламентирующие испытание	Методика испытаний, ГОСТ, правила техники безопасности, инструкция по эксплуатации установки
Срок проведения испытаний	10 дней
Обоснование метода испытания	Необходимо для определения влияния создаваемой при работе электромагнитной обстановки на выполнение всех рабочих операций системы

Продолжение табл. 4.3

Условия проведения испытаний	Испытания будут проводиться следующих условиях: <ul style="list-style-type: none"> • $T = 5-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ • Влажность: 60...75%
Материально-техническое обеспечение испытаний	Необходимые инструменты, дополнительные запчасти, конструкторская документация
Квалификация персонала по проведению испытаний	Инженер 2-ой категории
Работа устройства за 10 дней	Не менее 80 часов

При проведении испытаний оцениваются следующие показатели:

- внешнее состояние;
- конструкционные изменения;
- изменение температуры устройства.

Методика проведения испытаний, согласно стандартам качества, будет состоять из трех важных пунктов:

- 1) осмотр проектируемого робота до начала испытаний;
- 2) испытание робота во всех возможных режимах работы, а также с нагрузкой;
- 3) осмотр устройства после испытаний, поиск наличия дефектов.

По завершению каждого испытательного этапа составляется испытательный протокол, в котором содержится информация о всех изменениях устройства.

После проведения всех необходимых испытательных процедур составляется отчет в двух экземплярах (для заказчика и исполнителя).

4.3 Электробезопасность

При введении в эксплуатацию проектируемое устройство должно соответствовать требованиям электрической безопасности.

На сегодняшний день система по обеспечению электробезопасности должна выполнять следующие виды защит:

- изоляция токоведущей части устройства;
- барьеры или ограждения при проведении испытаний крупногабаритных устройств;
- дополнительные защиты, в частности, устройства отключения: предохранители или автоматы.

Более подробно средства защиты от поражения электрическим током представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. – Средства защиты от поражения электрическим током

Общетехнические	1) Изоляция 2) Блокировка 3) Ограждения
Специальные	1) Защитные: <ul style="list-style-type: none">• заземление• зануление• отключение 2) Плакаты безопасности 3) Знаки безопасности

Продолжение табл. 4.4

Индивидуальные	1) Изолирующие штанги 2) Клещи 3) Указатели напряжения 4) Диэлектрический костюм 5) Изолирующие подставки 6) Переносные заземления
----------------	---

Конструкция исследуемого объекта - робота состоит из двух основных компонентов: механического рычага и системы управления.

Они обычно связаны между собой одним или двумя большими многожильными кабелями.

При использовании двух кабелей один передает мощность на серводвигатели и тормоза, а второй передает обратную связь по положению для каждого соединения обратно в систему управления.

Исходя из этой характеристики робота, следует, что необходимо обеспечить электробезопасность при работе с многожильным кабелем.

Для этого следует определить класс защиты от поражения электрическим током в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61140-2000. Описание подразделений на безопасное использование оборудования представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Классы защиты от поражения электрическим током

Класс	Описание
0	Без особых средств защиты от поражения пользователя. Только рабочая изоляция.
00	Отличие от «0» - это индикация опасного напряжения.
000	Дополнительно имеется защитное устройство от превышения разности токов в проводах питания устройства (отключение через 0,08 с).

Продолжение табл. 4.5

0I	Имеется рабочая изоляция, все нетоковедущие части устройства имеют заземленный контур.
I	Заземление осуществляется с помощью системы «вилка-розетка». Имеется простая изоляция.
I+	В дополнении к предыдущему классу имеется устройство защитного отключения.
II	Двойная изоляция. Оборудование может стабильно работать при влажности до 85%.
II+	Двойная изоляция в комплекте с устройством защитного отключения.
III	Автономное питание устройства (36 В переменного тока и 42 В постоянного тока). Заземление может быть, но не для целей защиты, а от функциональных требований агрегата.

Для проектируемого робота-манипулятора класс защиты будет II (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Маркировка степени защиты II

Устройство может быть использовано при работе в помещениях повышенной опасности.

Защита робота будет осуществляться при двойной изоляции многожильных кабелей, которые используются для организации требуемых перемещений робота.

4.4 Степени защиты изделия

Для того, чтобы определить насколько безопасно защищена внутренняя часть устройства необходимо узнать степень защиты изделия или его IP/

Код IP является международной маркировкой. Он степень защиты от проникновения к внутреннему устройству агрегата человеком, пыли и воды.

Код стандартизирован Международной электротехнической комиссией (МЭК) и состоит из двух цифр:

- первая – обозначает степень защиты от проникновения твердых частиц внутренней составляющей устройства;
- вторая – является показателем защищенности агрегата от воды.

Сам код имеет вид IPXX (см. Рисунок 4.4).

Степени защиты		IP x0	IP x1	IP x2	IP x3	IP x4	IP x5	IP x6	IP x7	IP x8
		Нет защиты	Защита от капель воды падающих вертикально	Защита от капель воды падающих под углом 15° от вертикали	Защита от дождя	Защита от водяных брызг	Защита от водяных брызг под давлением	Защита от мощных водяных струй	Защита от погружения в воду на глубину не более 1м	Защита от затопления (глубина указывается дополнительно, в м.)
IP 0x	Нет защиты	IP00								
IP 1x	Защита от частиц > 50,0 мм	IP10	IP11	IP12						
IP 2x	Защита от частиц > 12,5 мм	IP20	IP21	IP22	IP23					
IP 3x	Защита от частиц > 2,5 мм	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34				
IP 4x	Защита от частиц > 1,0 мм	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44				
IP 5x	Защита от пыли частично	IP50				IP54	IP55			
IP 6x	Защита от пыли полностью	IP60					IP65	IP66	IP67	IP68

Рисунок 4.4 – Таблица определения степени защиты устройства

Исследуемый промышленный роботизированный манипулятор будет иметь степень защиты IP44.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была разработана и исследована система управления электроприводом робота манипулятора фирмы NOKIA «PUMA-560 PM-01». В ходе разработки и исследования были решены следующие задачи:

- 1) Был проведен сравнительный анализ электродвигателей применяемых в робототехнике;
- 2) Разработан верхний уровень аппаратной части электропривода;
- 3) Разработан драйвер для силового преобразователя двигателей постоянного тока на базе ПЛИС;
- 4) Были разработаны электрические схемы для согласования верхнего уровня управления с нижним уровнем, результаты которой приведены в Приложении В.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Конструирование роботов: Пер. с франц. / Андре П., Кофман Ж.-М., Лот Ф., Тайар Ж.-П. — М.: Мир, 1986. — 360с.
2. Коровин Б.Г., Системы программного управления./ Б.Г. Коровин, Г. И. Прокофьев, Л. Н. Рассудов. Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 320с.
3. Файнштейн, В.Г. Цифровые системы управления/ В.Г. Файнштейн, О.С. Воробейчик. — Кривой Рог: Издательство ГВУЗ «КНУ», 2014. — 159с.
4. Красовский А.Б. Основы электропривода. М: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015 г. — 408с.
5. Башарин А.В.Управление электроприводами/А.В.Башарин, В.А.Новиков, Г.Г.Соколовский.;Учеб.пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат. 1982. 392 с.
6. Муртазин А.З. Система управления для робота-манипулятора РУМА // Выпускная работа бакалавра, СПбГПУ, институт металлургии, машиностроения и транспорта, кафедра «Механотроники и роботостроения» ,СПб, 2016.
7. Устройство управления «Сфера-36» 3.623.017 № 50. Техническое описание.
8. Программная модель системы на кристалле / К. Е. Окунев, А. А. Ключарев // Информационно-управляющие системы, 2010, вып. 3. С. 44–50.

Приложение А.

Листинг программного кода для реализации временных задержек

```
module pwm_delay1 (pwm, pwm_delay0, clk);

input wire pwm, clk;
output reg pwm_delay0;
reg [6:0]counter1;
reg prev_pwm, prev1_pwm, q;
parameter delay1 = 6'b101;

// the pwm front highlighting
always @(posedge clk)
    prev_pwm <= pwm;
    wire back_edge;
assign    back_edge = ~prev_pwm & pwm;

//the pwm back highlighting
always @(posedge clk)
    prev1_pwm <= pwm;
    wire front_edge;
assign    front_edge = prev1_pwm & ~pwm;

// D - trigger with links
always @(posedge clk)
    begin
        if (counter1 >= delay1)
            begin
                q = 1'b0;
                pwm_delay0 = 1'b1;
            end
        else if (back_edge)
            begin
                q = back_edge;
                pwm_delay0 = 1'b0;
            end
        else if (front_edge)
            pwm_delay0 = 1'b0;
    end

// counter with reset on overflow
always @(posedge clk)
    begin
```

```

    if(counter1 >= delay1)
        counter1 <= 6'b0;
    else if (q == 1'b1)
        counter1 <= counter1 + 1'd1;
    end
endmodule

module pwm_delay2 (pwm, pwm_delay, clk);

input wire pwm, clk;
output reg pwm_delay;
reg [6:0]counter2;
reg prev_pwm, prev1_pwm, q;
parameter delay2 = 6'b101;

// the pwm front highlighting
always @(posedge clk)
    prev_pwm <= pwm;
    wire back_edge;
assign    back_edge = ~prev_pwm & pwm;

//the pwm back highlighting
always @(posedge clk)
    prev1_pwm <= pwm;
    wire front_edge;
assign    front_edge = prev1_pwm & ~pwm;

// D - trigger with links
always @(posedge clk)
    begin
        if (counter2 >= delay2)
            begin
                q = 1'b0;
                pwm_delay = 1'b1;
            end
        else if (back_edge)
            begin
                q = back_edge;
                pwm_delay = 1'b0;
            end
        else if (front_edge)
            pwm_delay = 1'b0;
    end
end

```

```

// counter with reset on overflow
always @(posedge clk)
begin
    if(counter2 >= delay2)
        counter2 <= 6'b0;
    else if (q == 1'b1)
        counter2 <= counter2 + 1'd1;
    end
endmodule

```

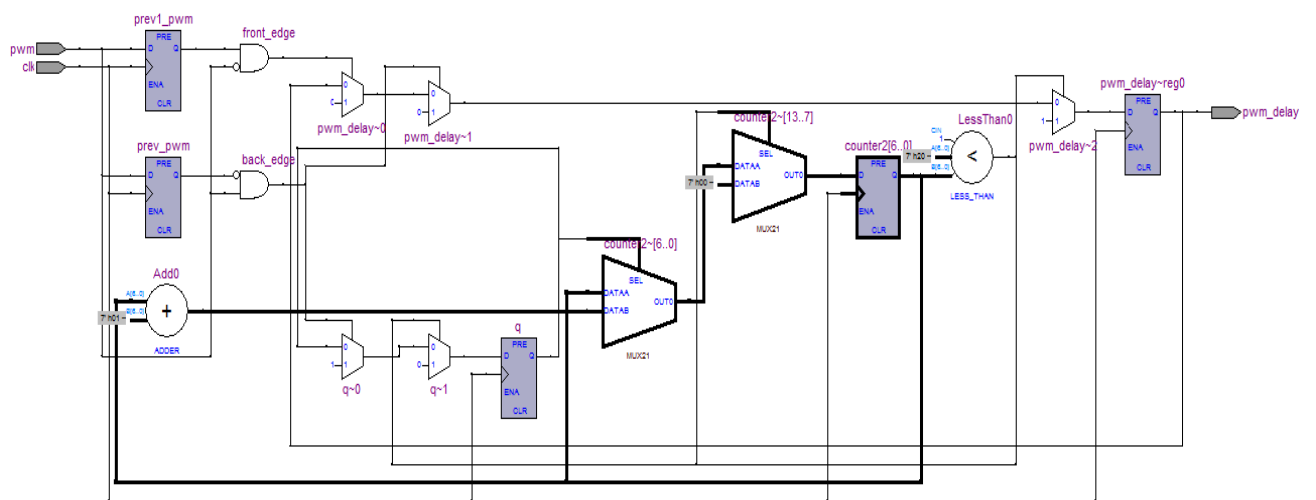


Рисунок А1. Логическое представление работы временных задержек в графическом виде

Приложение Б

Привязка контактов микросхемы

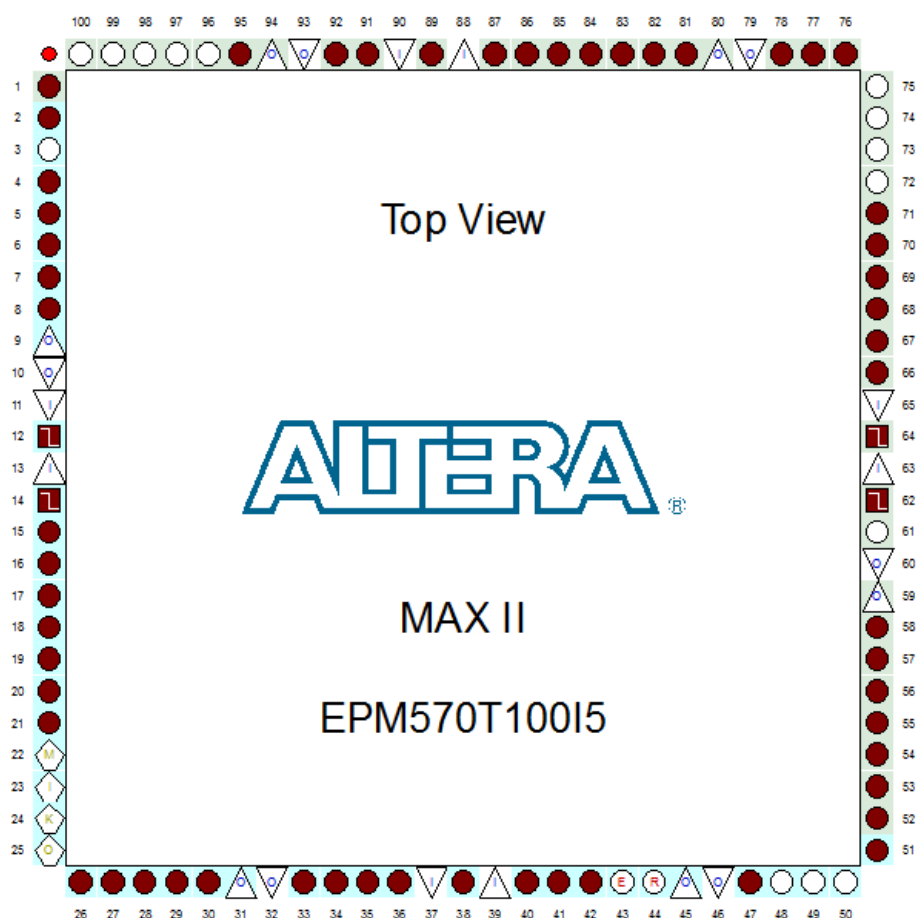


Рисунок Б1. Привязанные входы и выходы схемы к конкретным выводам ПЛИС

Входы микросхемы:

act	сигнал разрешающий работу силовых ключей
lp1a	сигнал перегрузки по току
sign	сигнал смены направления вращения
pwm	широтно-модулированный сигнал
clk	тактовый сигнал
a_channel_in	сигнал канала А
b_channel_in	сигнал канала В
index_in	индексный сигнал

Выходы микросхемы:

key11	сигналы управления ключами
key22	
key33	
key44	
a_channel_out	сигнал канала А
b_channel_out	сигнал канала В
index_out	индексный сигнал

Канал1

№	Навание пина	№PIN
1	key11	PIN_1
2	key22	PIN_3
3	key33	PIN_4
4	key44	PIN_5
5	act	PIN_6
6	lp1a	PIN_7
7	pwm	PIN_8
8	clk	PIN_12
9	sign	PIN_15
10	a_channel_in	PIN_16
11	a_channel_out	PIN_17
12	b_channel_in	PIN_18
13	b_channel_out	PIN_19
14	index_in	PIN_20
15	index_out	PIN_21

Канал2

№	Навание пина	№PIN
1	clk2	PIN_14
2	key11_2	PIN_26
3	key22_2	PIN_27
4	key33_2	PIN_28
5	key44_2	PIN_29
6	act2	PIN_30
7	lp1a2	PIN_33
8	pwm22	PIN_34
9	sign2	PIN_35
10	a_channel_in_2	PIN_36
11	a_channel_out_2	PIN_38
12	b_channel_in_2	PIN_40
13	b_channel_out_2	PIN_41
14	index_in_2	PIN_42
15	index_out_2	PIN_47

Канал3

№	Навание пина	№PIN
1	key11_3	PIN_51
2	key22_3	PIN_52
3	key33_3	PIN_53
4	key44_3	PIN_54
5	act3	PIN_55
6	lp1a3	PIN_56
7	pwm23	PIN_57
8	sign3	PIN_58
9	clk3	PIN_62
10	a_channel_in_3	PIN_66
11	a_channel_out_3	PIN_67
12	b_channel_in_3	PIN_68
13	b_channel_out_3	PIN_69
14	index_in_3	PIN_70
15	index_out_3	PIN_71

Канал4

№	Навание пина	№PIN
1	clk4	PIN_64
2	key11_4	PIN_76
3	key22_4	PIN_77
4	key33_4	PIN_78
5	key44_4	PIN_81
6	act4	PIN_82
7	lp1a4	PIN_83
8	pwm24	PIN_84
9	sign4	PIN_85
10	a_channel_in_4	PIN_86
11	a_channel_out_4	PIN_87
12	b_channel_out_4	PIN_91
13	b_channel_in_4	PIN_89
14	index_in_4	PIN_92
15	index_out_4	PIN_95

Перечень элементов электрической схемы для 4-го звена

[illegible]

