

Оглавление

Введение	4
1 Исследование принципа работы бесколлекторного двигателя постоянного тока (Brushless DC-Motor), построение функциональной и кинематической схемы.	10
1.1 Обзор конструкции современного бесщеточного двигателя постоянного тока или BLDC (Brushless DC-Motor).	10
1.2 Принцип действия инкрементального магнитного датчика исследуемого двигателя	14
1.3 Построение кинематической схемы	17
2. Разработка принципиальной электрической схемы системы управления с возможностью программирования по интерфейсу JTAG и управлением по CAN шине.	22
2.1 Разработка силовой схемы, выбор элементов	22
2.2 Выбор схемы формирователей импульсов	23
2.3 Выбор контроллера	28
2.4 CAN (Control Area Network)	33
2.5 Преобразователь USB – CAN	39
2.6 Стандарт CIA 402	41
2.7 Интерфейс JTAG (Joint Test Action Group)	47
3. Математическое моделирование системы электропривода	55
3.1 Математическая модель компонентов системы электропривода	55
3.2 Моделирование режимов работы системы электропривода с управлением по скорости	59
3.3 Моделирование режимов работы системы электропривода с управлением по положению	63
Заключение	68
Список используемых источников	70

Приложение 1	73
Приложение 2	74
Приложение 3	75
Приложение 4	76

Введение

В конце 20 века в машиностроении широкое развитие получили робототехнические комплексы, в погоне за прибылью производители современных товаров вынуждены учитывать различные требования потребителей. Основными требованиями к товарам во все времена были их цена и качество. Удешевить продукцию легче всего наладив серийный выпуск, а для улучшения качества на производстве требуется максимально исключить из производственного процесса, так называемый, «человеческий фактор». Именно эти 2 составляющие являются основной причиной развития робототехники в машиностроении. Там где раньше едва справлялся человек стали устанавливать манипуляторы, например в тяжелых условиях, когда требуется выполнять однообразную монотонную работу. Для примера: снимать алюминиевые заготовки после отливки и класть их в обрубной пресс. Эта работа вызывала задержки в выпуске продукции. Люди вынуждены были работать с раскаленным металлом, выполняя однообразную монотонную работу изо дня в день. Часто случались случаи травматизма, ожоги, ампутация пальцев. На такую работу было сложно найти желающих, поэтому возникла проблема с нехваткой кадров и как следствие - продукция. Установка в этом месте роботов-манипуляторов исключила проблему травматизма, а за долгие годы исправной работы все затраты на установку и обслуживание с лихвой окупались. [11,24]

В 21 веке производители стали предъявлять особые требования к самим роботам. Скорость, точность позиционирования, ремонтпригодность, грузоподъемность, унификация узлов, цена – вот далеко не полный список критериев для выбора робота. В машиностроении роботы классифицируются: роботы сварки, переключники, окрасочные роботы. Основные современные фирмы производители роботов: KUKA, ABB, Fanuc. Эти 3 фирмы хорошо зарекомендовали себя на рынке оборудования, благодаря надежной работе своей продукции. В ПАО «АВТОВАЗ» роботы фирмы ABB применяются в

основном в цехах окраски производств СКП, СКП-Калина, ППИ. Но хотелось бы подробнее остановиться на роботах фирмы КУКА, которые уже давно применяются в ПАО «АВТОВАЗ» и особенно на роботах сварки. На ПТО – производстве технологического оборудования с давних пор был налажен выпуск манипуляторов с системой управления «БЕТТА» (Рис.1.1). Именно они в 90-ых годах были установлены в ЦАЛ (цехе алюминиевого литья). И благодаря им мы, как электромеханики, получили для проведения исследований привода типа ПТ150/20 и ПТ240/30, которые являются приводами подачи и расположены в специальном шкафу управления (см. Рис1.1 б)- шкаф приводов). На момент, когда шла установка этих роботов- это были современные, по тем меркам привода и система управления (см. Рис.1.1 в)- шкаф системы управления).[22,27]



а)

б)

в)

Рисунок 1.1 - робот «БЕТТА»

а- манипулятор, *б*- шкаф приводов, *в* – шкаф системы управления

Двигатели с печатным ротором типа ДР-08 были новинкой. А некоторые шкафы были укомплектованы синими приводами, похожими на ПТ, (но отличались другими платами управления) немецкой фирмы Seidl. А через некоторое время в МСП на сварке заднего моста появились роботы фирмы KUKA с приводами похожими на ПТ и 54К-М, но назывались они уже TRM 20 и TRM 30.[7]



а)

б)

Рисунок 1.2 Робот KUKA семейства KR C4

а – шести осевой манипулятор, *б* - шкаф управления

Теперь их сменили роботы с системой управления KR C4. Они стали компактнее - вся система управления, вместе с шестью приводами и источниками питания размещается в небольшом шкафу управления (Рис. 1.2 б) – шкаф управления роботом KUKA KR C4).[13]

Установив специальный сварочный аппарат на этот робот, который сваривает детали ходовой системы автомобиля в автоматическом режиме сварочной проволокой в среде углекислого газа. Мы получаем современный сварочный комплекс. Это комплекс с унифицированной системой управления, надежный, обеспечивающий заданную точность и обеспечивающий хорошую производительность. Профессиональный интерес в этом вызывает устройство подачи проволоки. На этом комплексе оно выполнено в виде синхронизированных во времени микродвигателей подачи связанных между собой и с системой управления робота. Вот эти микродвигатели и вызывают интерес. При детальном исследовании выясняется, что механизм протяжки проволоки состоит из 2х частей. Один механизм является основным – master feeder, а другой вспомогательным - Slave feeder.[18]

Актуальность темы. Тема сварки в машиностроении всегда была актуальной, с появлением новых электронных компонентов и миниатюризацией силовых элементов в старых громоздких сварочных аппаратах больше нет надобности. На их место пришли новые, построенные на IGBT модулях инверторные преобразователи, которые способны с особой точностью следить за сварочным током. Современный сварочный аппарат, установленный на роботизированном комплексе это прорыв. Робот, не устает, ему не нужно волноваться о защите глаз, рук, участков кожи. Постоянные сложные движения для него не проблема, он может работать и днем и ночью. Но не каждый сварочный аппарат можно установить на манипуляторе. Распространение получили автоматические аппараты сваривающие металл в среде углекислого газа. А в таких аппаратах наиболее уязвимым местом является двигатель подачи проволоки. Именно от его качественной работы, зависит качество сварного шва. Ведь если он будет подавать проволоку рывками или с пропусками, пострадает качество сварного шва, а продукция пойдет в брак. Поэтому на сегодняшний день актуально разрабатывать новые

системы подачи проволоки, минимизировать их, а с появлением новых технологий активно их внедрять.

Проблематика. Через 2 года работы сварочных комплексов, после окончания срока гарантийной эксплуатации выяснилось, что микродвигатель механизма Master feeder перестает работать. С чем это связано никому не известно. Видимые повреждения отсутствуют, после длительной проработки выяснилось, что двигатель остается исправен, а причина его неработоспособности заключается в выходе из строя привода, встроенного в двигатель. Однако, таких двигателей с неисправными приводами в ремонте уже скопилось 6 шт. цена каждого около 3000 евро. С ростом цен на иностранные валюты имеем рост убытков. Политическая обстановка в стране и курс на импортозамещение требуют разработки своих аналогичных систем которые должны иметь ряд преимуществ, например управление по CAN шине, но тема эта новая, не изученная. Учебников по данной теме нет, информации мало и в основном всё, что удается найти написано на иностранных языках.[5]

Объектом исследования является BLDC (Brushless DC-Motor) двигатель подачи сварочной проволоки в узле – master feeder сварочного комплекса с манипулятором ф. KUKA.

Предметом исследования является совершенствование системы управления BLDC двигателем путем объединения двигателя и системы управления в единый мехатронный узел.

Целью магистерской диссертации ставится разработка встраиваемой системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока (Brushless DC-Motor) с возможностью управления по протоколу CAN open.[21,26]

Задачи:

- исследование принципа работы бесколлекторного двигателя постоянного тока (Brushless DC-Motor) или вентильного двигателя, построение функциональной и кинематической схемы;

- разработка принципиальной электрической схемы системы управления с возможностью программирования по интерфейсу JTAG и управлением по CAN шине.

- математическое моделирование и оценка динамических характеристик полученной встраиваемой системы управления с инкрементальным магнитным датчиком.

Новизна заключается в разработке способов диагностики и тестирования современных приводных систем с управлением по CAN шине, разработке принципиальной электрической схемы, написании алгоритма работы программы микроконтроллера.

Теоретическая значимость путем проведения исследований в области проектирования систем управления с CAN шиной выяснить структуру и назначение основных команд управления протокола CAN-OPEN , расшифровка кадров, моделирование режимов работы системы электропривода с управлением по положению и по скорости используя инструмент MATLAB.

Практическая значимость базируясь на результатах исследований в области CAN протокола создать методику управления приводами с помощью доступных средств с целью контроля параметров и ввода в эксплуатацию.

Структура диссертации.

1. Исследование принципа работы бесколлекторного двигателя постоянного тока (Brushless DC-Motor), построение функциональной и кинематической схемы.

1.1 Обзор конструкции современного бесщеточного двигателя постоянного тока или BLDC (Brushless DC-Motor), его еще называют вентильным двигателем.

Для обзора двигателя был выбран электродвигатель фирмы Faulhaber серии 3564 именно его применила фирма KUKA в качестве главного двигателя подачи сварочной проволоки в своем роботизированном сварочном комплексе.

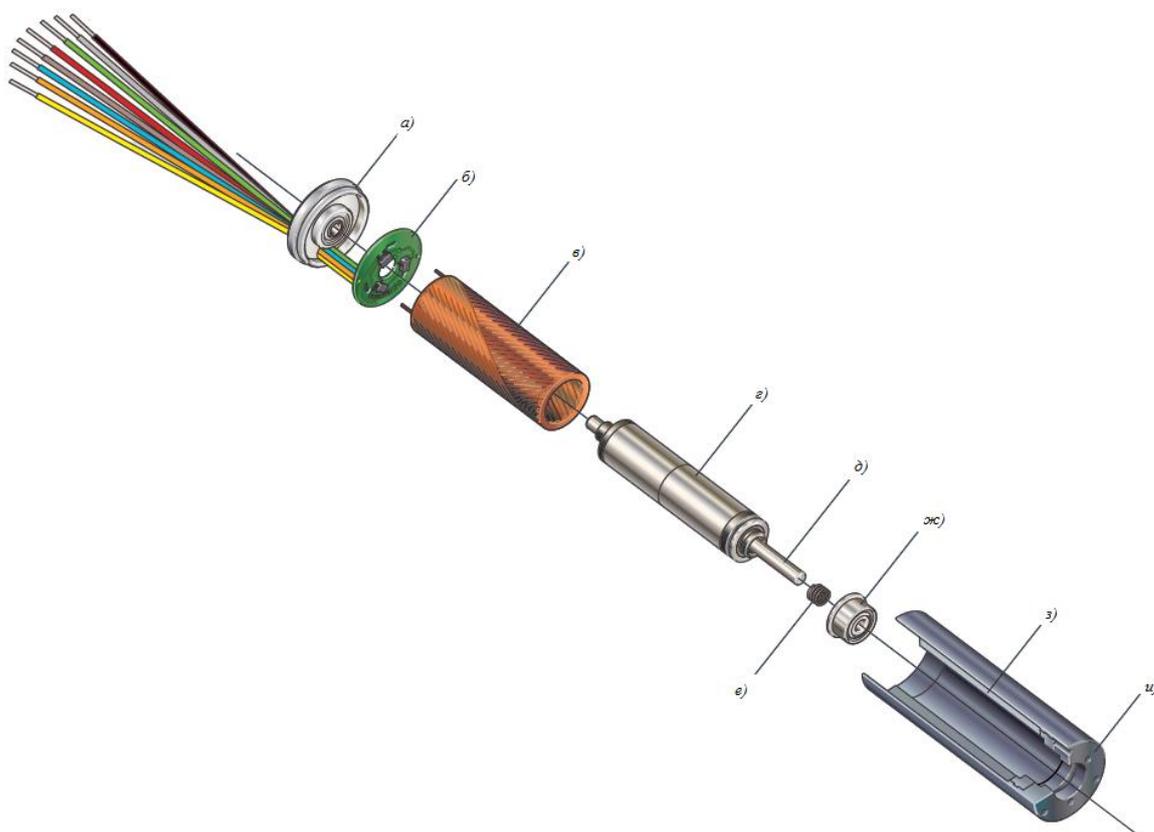


Рис. 1.3 - конструкция современного BLDC двигателя фирмы Faulhaber
a - задняя крышка с подшипником, *б* - плата датчика положения ротора, *в* - обмотка, *г* - магнит, *д* - вал, *е* - пружина, *ж* - подшипник, *з* - статор, *и* - корпус.[1,9]

Бесщеточный двигатель постоянного тока представляет собой трехфазный синхронный двигатель с ротором на постоянных магнитах и датчик положения ротора. При этом положение ротора определяется 3мя датчиками Холла, установленными определенным образом на плате под углом 120° . Таким образом, получается, что для работы такому двигателю нужно 8 проводов. Три провода для создания магнитного поля в статоре, 3 провода для системы управления (выход с датчиков холла H_a , H_b , H_c) и 2 провода – питание датчиков Холла. Именно это и видно на Рисунке 1.3.[3]

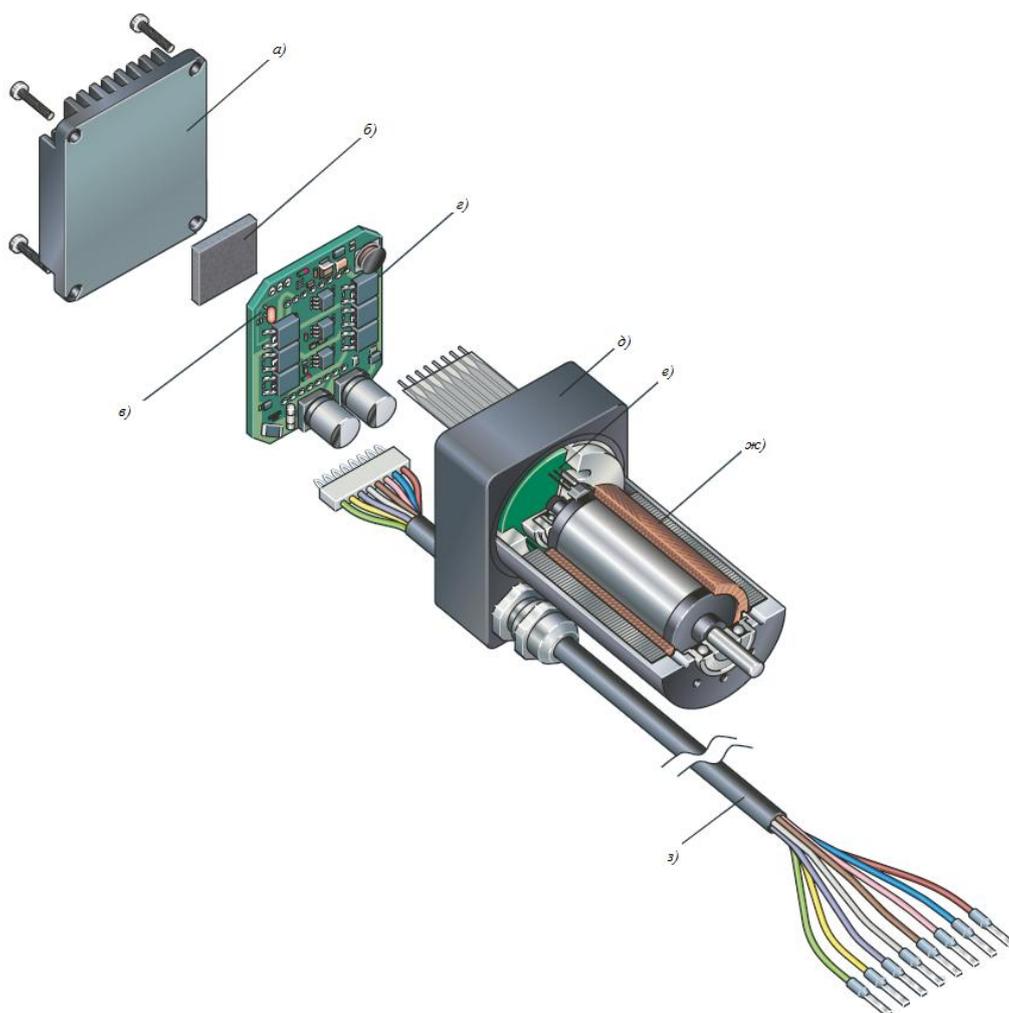


Рисунок 1.4 Двигатель 3564 со встроенным контроллером вращения

a – крышка – радиатор, *б* – термопрокладка, *в* – датчик температуры, *г* –интегрированная плата управления, *д* – корпус интегрированного

контроллера вращения, *е* – плата инкрементного магнитного датчика положения ротора, *жс* – обмотка статора, *з* – кабель подключения [4]

На Рис. 1.4 изображен уже знакомый нам двигатель серии 3564 но укомплектованный встраиваемым контроллером вращения позиция *з* – кабель подключения имеет 8 цветных проводов. Теперь разберем схему подключения данного устройства и определимся с цветовой маркировкой.

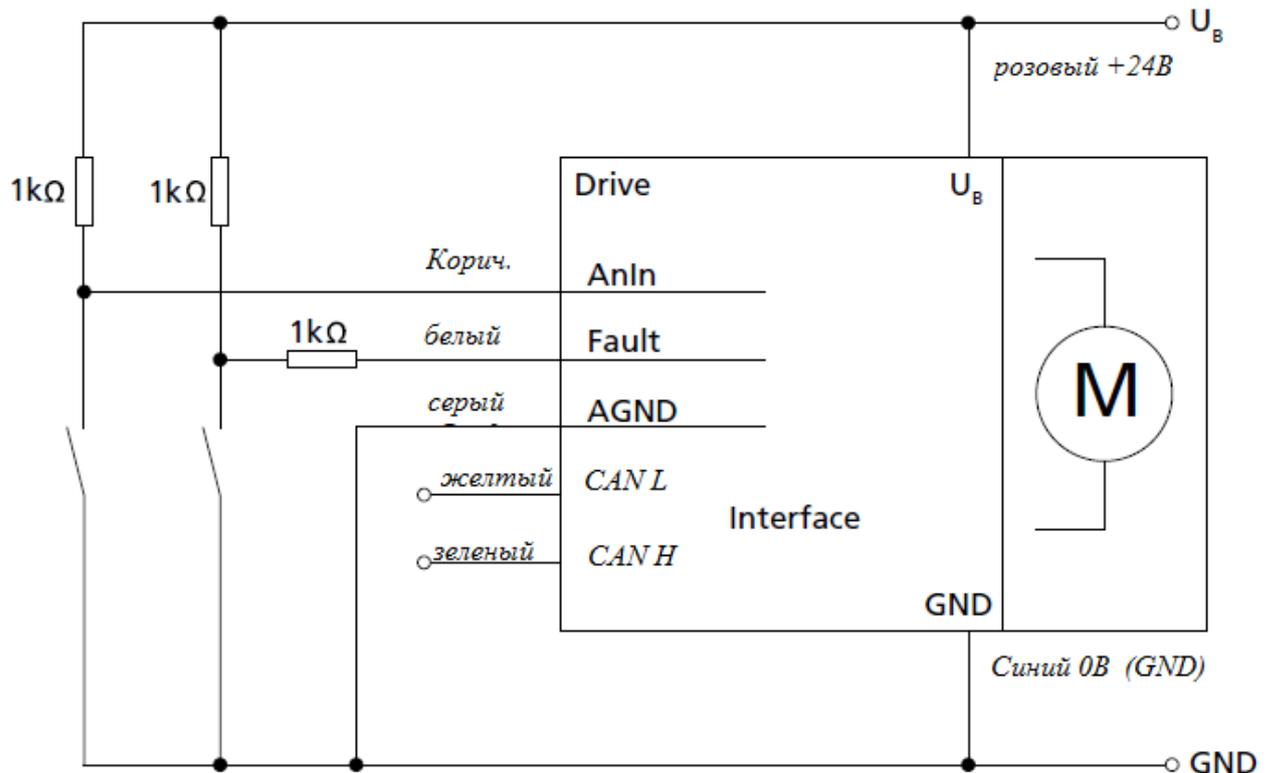


Рисунок 1.5 Стандартная схема подключения контроллера вращения бесщеточного двигателя постоянного тока BLDC 3564 [2]

Провода розовый и синий (Рис. 1.5) подводят к приводу напряжение питания 24 Вольта. Желтый и зеленый (CAN L и CAN H) сигналы управляющей шины CAN BUS по которой происходит управление вращением двигателя и другие операции, например: переключение режимов работы с ручного на автоматический, идентификация двигателя и контроль системы управления за моментом на валу. Назначение проводов серого и красного рассмотрим ниже, а белый и коричневый через контакты управляют вращением

в одну и в другую стороны, когда контроллер находится в ручном режиме работы. [10]

Особого внимания заслуживает контакт под названием Fault, в зависимости от конфигурации он может быть использован как выход для сигнализации об ошибке (при возникновении неисправности), а может быть использован как бинарный вход.

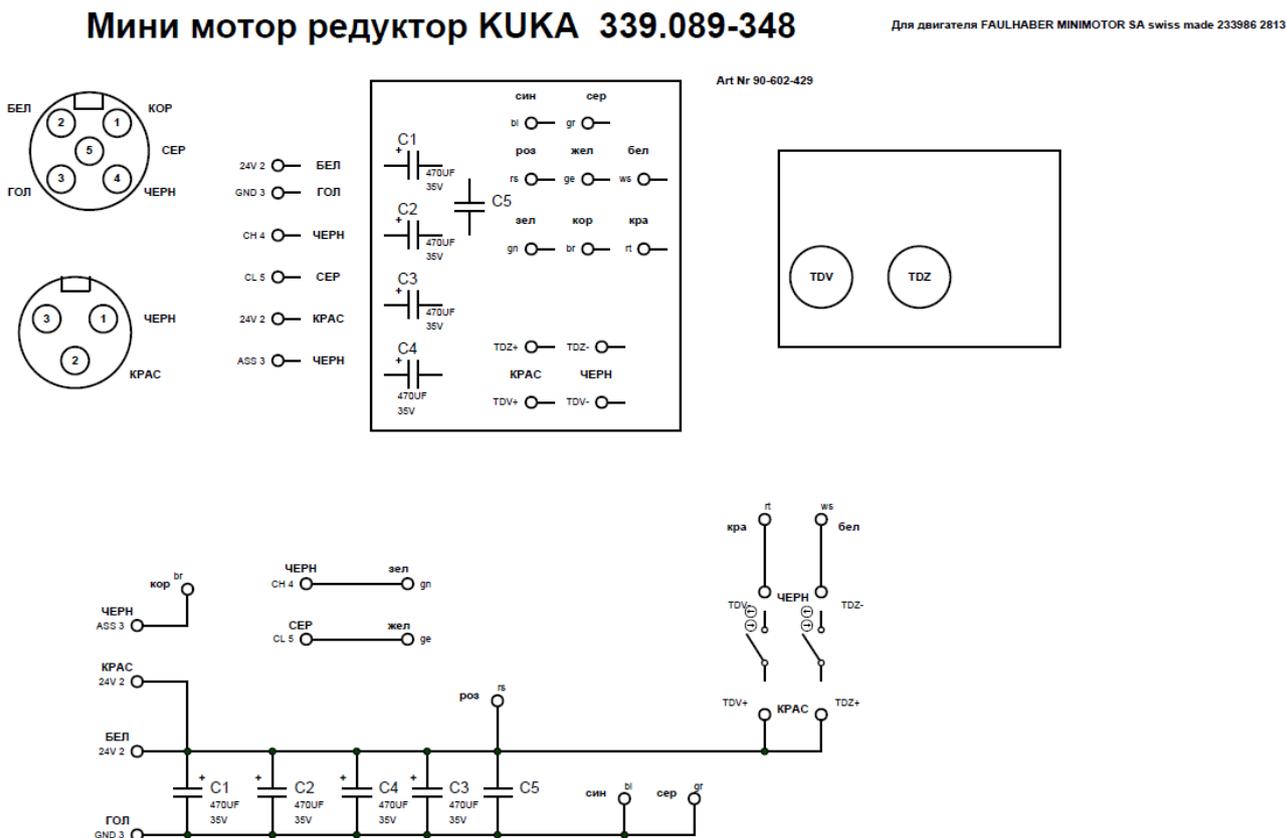


Рисунок 1.6 схема дополнительного навесного оборудования.

На (Рис.1.6) изображена схема дополнительной платы навесного оборудования, разработанного фирмой KUKA. Служит это оборудование для возможности ручной регулировки подачи сварочной проволоки из сопла сварочной головки. Когда оператор заходит в зону сварки, соблюдая при этом все необходимые предосторожности по технике безопасности и ему нужно отрегулировать вылет сварочной проволоки. Он просто нажимает кнопки TDV и TDZ и происходит синхронное включение 2х узлов, основного и

вспомогательного, после чего подается проволока, или в зависимости от того какую кнопку нажал оператор – реверс. Закрепление кнопочного узла на корпусе двигателя позволяет сэкономить место, при этом нет лишних проводов. На устройстве всего 2 разъема по одному 4х проводному подключается CAN шина и шина питания двигателя 24Вольта, а на другой должен приходить аналоговый сигнал вход 3IN который может быть использован как аналоговое задание для привода в ручном режиме. Изменяя величину напряжения на котором можно добиться изменения скорости подачи проволоки в ручном режиме работы. Этими кнопками, как показала практика операторам приходится пользоваться очень часто, поэтому со временем они начинают залипать и изнашиваться. К разъемам также есть ряд требований, они должны обеспечивать хорошее герметичное соединение и пропускать тока порядка 10 Ампер.[25]



Рисунок 1.7 Двигатель ф. Faulhaber с навесным оборудованием ф.КУКА. и микро редуктором.

1.2 Принцип действия инкрементального магнитного датчика исследуемого двигателя

Слово increment – в переводе означает прирост, значит происходит добавление... Но в начале несколько слов о датчиках Холла. Рассмотрим работу датчика Холла на примере в 1879 году был обнаружен эффект Холла. Автор Эдвин Герберт Холл - американский физик пропуская ток по тонкой золотой пластине находящейся в магнитном поле обнаружил явление возникновения ЭДС (возникающей под действием силы Лоренца) позднее названное Холловским напряжением. Этот эффект лег в основу работы датчика Холла, который имеет 2 входа питания для создания тока и при появлении магнитного поля на выходе у него возникает разность потенциалов, которая потом может быть преобразована в удобный для системы управления вид. Датчики тока могут быть отъюстированы на заводе изготовителе и иметь целую схему преобразования, бывают с токовым выходом, бывают с выходом по напряжению. Для понимания как выглядит такой датчик можно изучить Datasheet на solid sensor фирмы Honeywell 2SS52M. Рассмотрим принцип действия инкрементального магнитного датчика положения ротора входящего в наш BLDC мотор. Двигатель является машиной двухполюсной, в них устанавливаются магнитные диски имеющие форму изображенную на (Рис. 1.8) взаимодействуя с датчиками Холла такая конструкция и образует датчик положения ротора. Не стоит забывать, что для работы датчиков тока требуется питание, в нашем случае оно составляет 5В.[6]

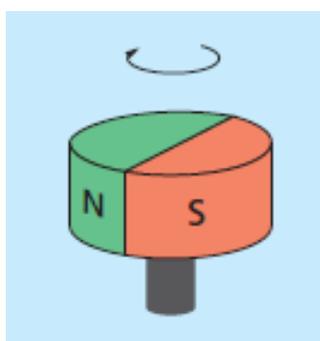


Рисунок 1.8 магнитный сердечник двухполюсного BLDC. [1]

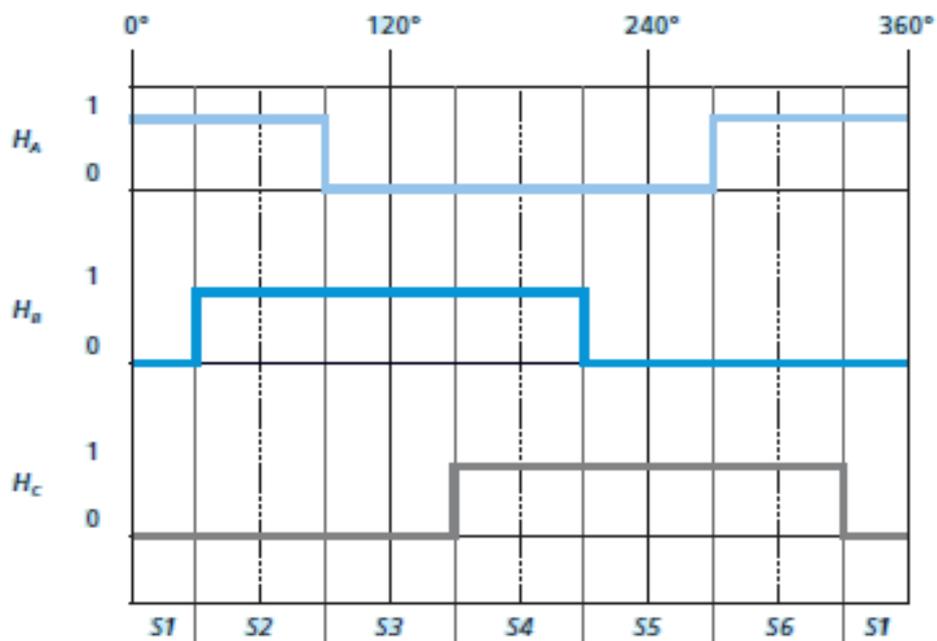


Рисунок 1.9 диаграмма работы инкрементального магнитного датчика положения ротора в бесколлекторном двигателе постоянного тока семейства 3564 фирмы Faulhaber. [1]

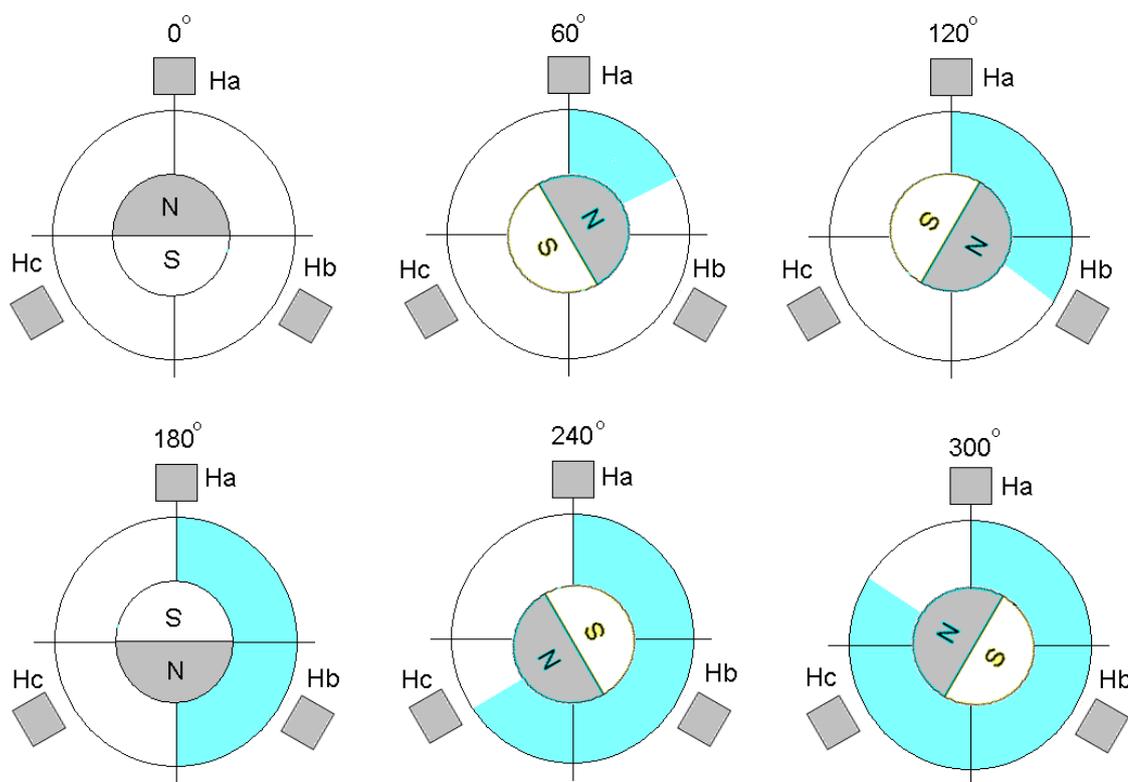


Рисунок 1.10 Диаграмма положения ротора и перекрытия датчиков при совершении вращения

На диаграмме изображена коммутация выходов датчиков Холла (H_a , H_b , H_c) в инкрементальном датчике положения у которого есть 2х полюсный постоянный магнит установленный на роторе и 3 датчика закрепленных на плате под углом 120° по отношению друг к другу. Для понимания работы диаграммы можно схематично изобразить положение вала относительно датчиков. (См. рис. 1.10). Итак в положении 0° ротор повернут к верхнему датчику H_a северным полюсом, соответственно на диаграмме видим уровень логической 1, с изменением положения вала 60° меняется состояние датчиков и в логической единице H_a и H_b , при 120° в логической 1 остается только датчик H_b , при 180° в логической 1 датчики H_b и H_c и т.д.[8]

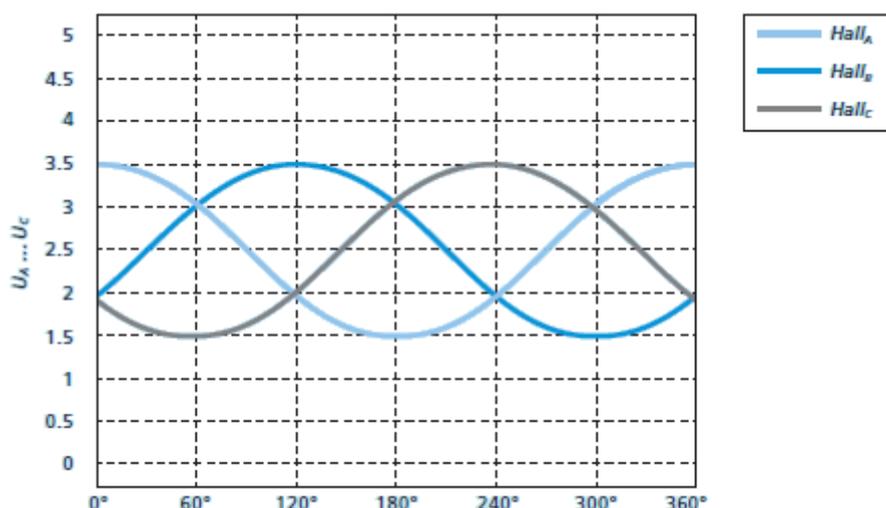


Рисунок 1.11 Осциллограммы с датчиков холла [1]

1.3 Построение кинематической схемы.

Построение кинематической схемы начнем с исследования механической части основного узла подачи сварочной проволоки. Кинематическая схема требуется для того, чтобы проследить последовательность передачи движения от двигателя к исполнительным механизмам.

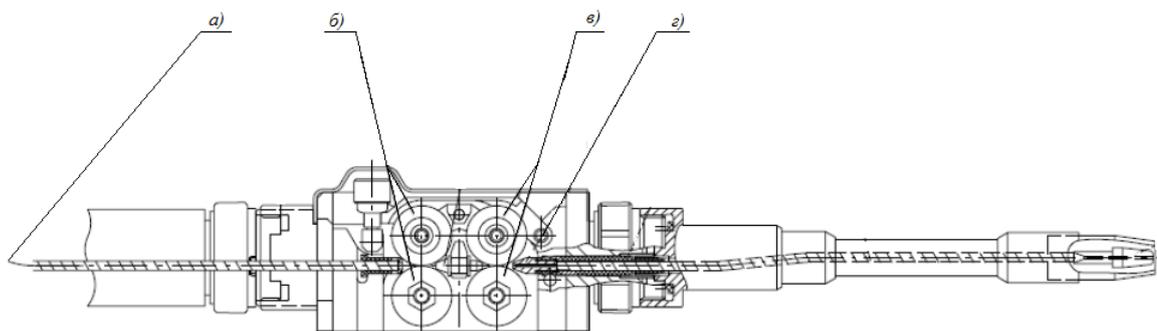


Рисунок 1.12 эскиз основного узла подачи проволоки.

а – сварочная проволока, *б* – пара принимающих роликов, *в* – пара передающих роликов, *г* – поворотный узел отвода роликов

Из (рис. 1.12) видно, что для подачи сварочной проволоки *а*) в зону сварки требуется 2 пары роликов, назовем первую пару роликов *б*) принимающими, т.к. они принимают проволоку от вспомогательного узла, а вторую *в*) – передающей парой роликов. При замятии проволоки реализована возможность отодвигать верхние ролики и регулировать прижим, благодаря тому, что прижим выполнен на шарнире *г*) с одной стороны и имеет возможность регулировки регулировочным винтом с другой стороны. Что касается прослеживания передачи вращения от двигателя к роликам, то детально исследовать этот узел не представляется возможным, т.к. известно, только то, что двигатель связан с исполнительным механизмом через миниатюрный редуктор, устройство которого неизвестно. Поэтому можно только построить предположения как это должно происходить. На (рис. 1.13) изображена предположительная кинематическая схема. [29]

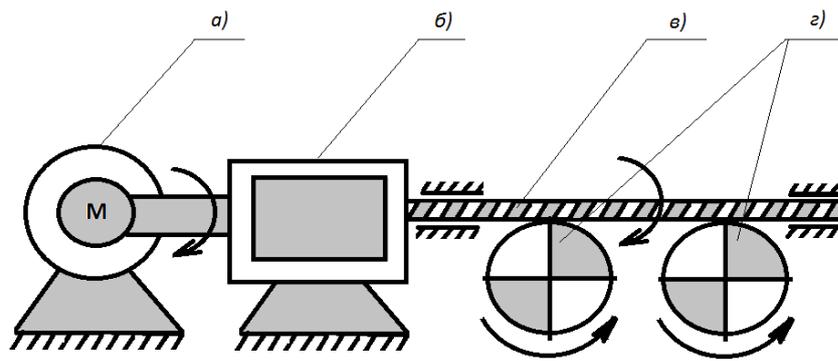


Рисунок 1.13 предположительная кинематическая схема

a- двигатель, *б* – редуктор, *в* - червячный вал, *г*- приводные шестерни роликов подачи сварочной проволоки.

Из кинематической схемы видно, что приводные шестерни *г*), вращаются в одну и ту же сторону, что необходимо для поступательного движения проволоки. Данная схема имеет недостаток, чтобы обеспечить высокую скорость подачи проволоки требуется высокоскоростной двигатель *a*). Чтобы червячный вал смог свободно вращаться и передавать вращающий момент шестерням требуется высокомоментный двигатель, чтобы повысить

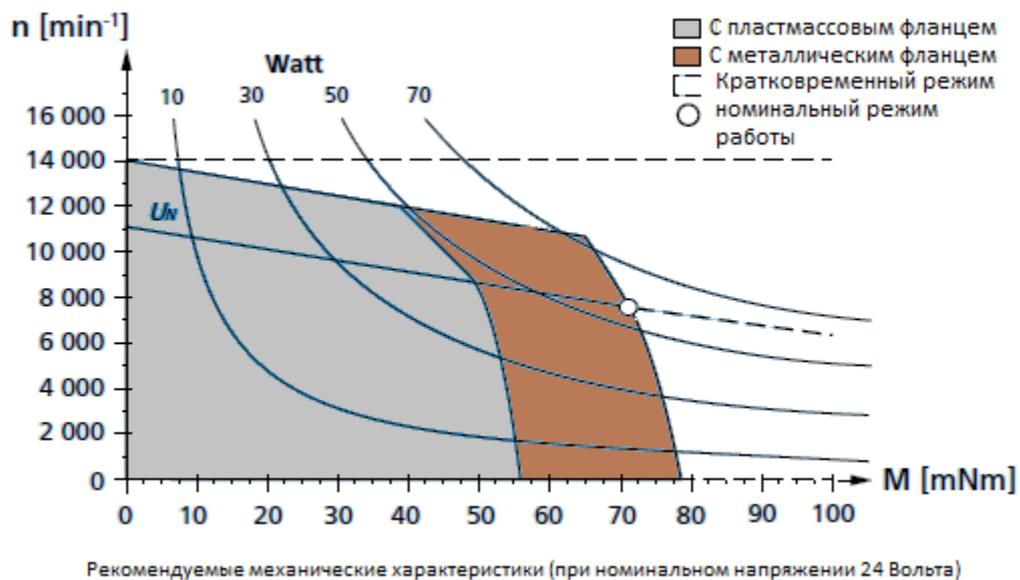


Рисунок 1.14 Рекомендованные в каталоге на двигатель механические характеристики [1]

вращающий момент и обеспечить непрерывное движение проволоки был установлен дополнительный редуктор б).[12]

Из предположительной кинематической схемы и рекомендуемых механических характеристик (Рис. 1.14) видно, что вентильный двигатель должен быть высокоскоростным с номинальной скоростью работы 11000 оборотов в минуту. В нашем случае фланец металлический, поэтому номинальный момент может достигать значения 0.0725 Нм.

Таблица 1.1 электрические параметры двигателя серии 3564К [1]

Наименование характеристики	Обозначение	Величина	Ед. изм.
Питание электроники	U_B / U_{EL}	12...30	В
Питание двигателя	$/ U_B$	0...30	В
Номинальное напряжение	U_N	24	В
Обороты холостого хода (при $U_N = 24В$)	n_0	11000	Об/мин.
Максимальный пиковый момент	M_{max}	142	мНм
Частота переключения ШИМ	f_{PWM}	78000	Гц
К.п.д.	η	95	%
Ток питания цепей электроники	I_{EL}	0.055	А
Ток двигателя номинальный	I_N	3.75	А
Диапазон изменения скорости вращения вала (при питании до 30В)		1-14000	Об/мин.

Двигатель серии 3564 выполнен в виде цилиндра у которого диаметр составляет 35мм, а длина 64мм. Двигатель снабжен редуктором что позволяет снизить скорость вращения и добавить крутящий момент, передаваемый на валу. Редуктор по виду напоминает планетарный.[28]

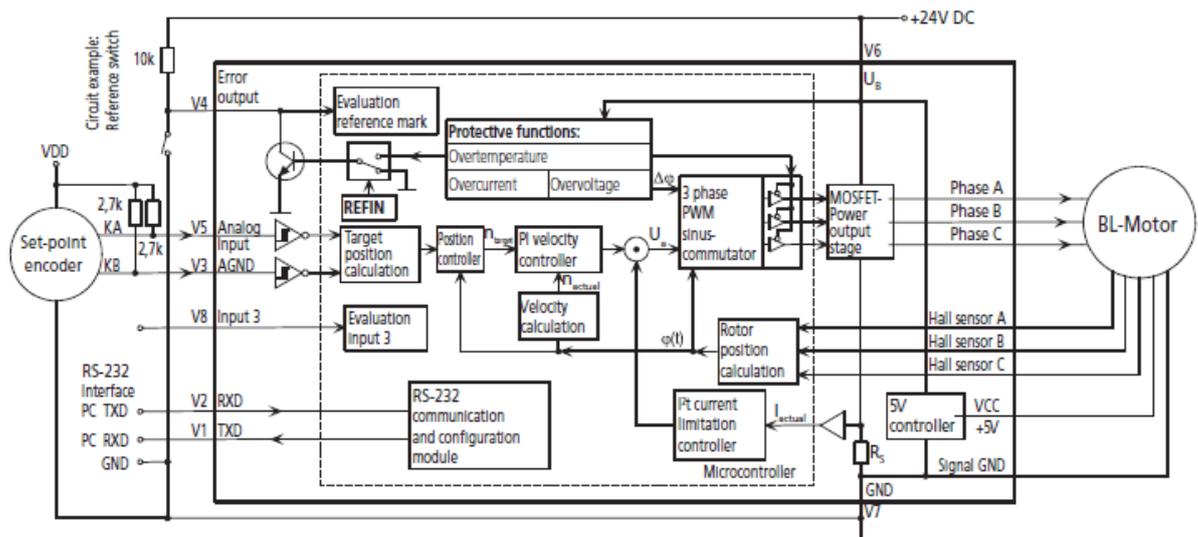


Рисунок 1.15 Функциональная схема исследуемого двигателя [7]

Изображенная на (Рис.1.15) функциональная схема изображает сам двигатель, встроенный инкрементальный магнитный датчик, блок с выходными силовыми транзисторами, цифровые, аналоговые входа, блоки коммуникационных интерфейсов, блок защит, преобразователь тока в напряжение, и отражает работу контроллера контуром контроля скорости и положения.

В первой части было проведено исследование принципа работы бесколлекторного двигателя постоянного тока (Brushless DC-Motor) или вентильного двигателя, построены функциональная и кинематическая схемы, исследованы режимы работы инкрементального магнитного датчика, схемы подключения разрабатываемого силового блока, основные электромеханические характеристики сведены в таблицу 1.1.[23]

2. Разработка принципиальной электрической схемы системы управления с возможностью программирования по интерфейсу JTAG и управлением по CAN шине.

2.1 Разработка силовой схемы, выбор элементов.

Для коммутации обмоток BLDC двигателя требуется силовая схема, обычно используют 3х фазную мостовую схему на бти транзисторах. Она проста в исполнении имеет ряд преимуществ, силовые транзисторы часто выпускаются в виде силовых модулей сразу собранных по такой схеме, иногда вместе с выпрямителем и транзистором для сброса энергии. Последнее время широкое распространение в технике получили IGBT (Insulated gate bipolar transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором) транзисторы. Из мировых лидеров по производству силовых транзисторов можно выделить Semikron, International rectifier, Infineon, IXYS, Fairchild, Toshiba, Fuji, Tyco и еще несколько фирм. Транзистор хорош тем, что сочетает в себе свойства и полевого и биполярного транзистора при этом пропускает большие токи и мало греется.[14]

При подборе транзисторов для инвертора особую роль играют параметры, такие как: управляющее напряжение, наибольший допустимый ток, напряжение пробоя между коллектором и эмиттером, входная емкость, выходная емкость, время задержки на включение, время задержки на выключение и внутреннее сопротивление. Для того чтобы определиться с транзистором для начала нужно знать величину напряжения, тока, частоты на которых будет работать транзистор. Они определяются нагрузкой. Основываясь на значениях сведенных в таблицу 1.1 первого раздела диссертации выясняем, что максимальное значение выходного напряжения подходящего к двигателю не больше 30 В. Для такого напряжения отлично подойдут транзисторы типа MOSFET типа NP32N055LE в корпусе TO252, напряжение исток сток 55V максимальный импульсный ток 32A. Для данного типа преобразователя частоты эти транзисторы подойдут лучше чем по технологии IGBT, так как в

открытом состоянии имеют очень малое сопротивление всего 0.024Ом, что сказывается на потерях в виде тепла. Входная емкость составляет 1200-2000pF при частоте в 1Мгц. Эта характеристика понадобится позднее для подбора бутстрепных конденсаторов.[30]

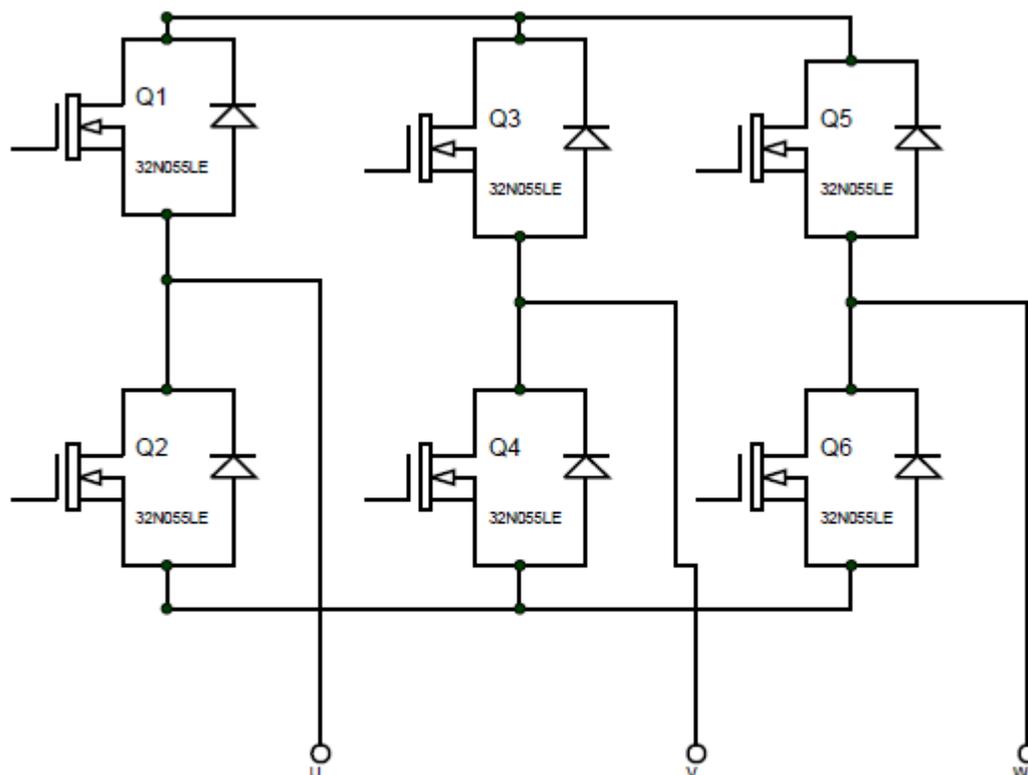


Рисунок 2.1 трехфазная мостовая схема на N канальных MOSFET транзисторах.

2. 2 Выбор схемы формирователей импульсов

Схема формирователей импульсов нужна для коммутации силовых транзисторов. Транзисторы работают в ключевом режиме для их открывания и закрывания требуются импульсы. Эти импульсы должны иметь четкие, не затянутые фронты. Так же имеется особенность, импульсы для верхних транзисторов должны быть гальванически развязаны с импульсами нижних транзисторов. Поэтому для цепей управления формирователей импульсов

обычно проектируют одинаковые схемы каналов, но при этом используют 4 гальванически развязанных источника питания. Один для нижних транзисторов, и 3 для верхних. Эта необходимость обусловлена принципом работы транзистора. Это правило было необходимо для старых биполярных транзисторов, в нашем случае используются полевые транзисторы, схема формирователя для которых значительно упростилась. Для открывания и запираания, которого требуется подавать напряжение на затвор относительно стока или эмиттера (в зависимости от структуры транзистора). [14]

При этом проектируют схемы питания на одном трансформаторе с большим количеством обмоток или на разных импульсных трансформаторах по одному на канал или на 2 канала. В любом случае эта характерная особенность компактности проектируемому устройству не добавляет. Фронты импульсов также имеют свои особенности, для четкой коммутации они должны быть не затянутыми. Поэтому при проверке работы цепей формирователей импульсов необходимо «прогружать» каждый канал. К затягиванию импульсов обычно приводят старые оптроны, которые служат для гальванической развязки силовых цепей от низковольтных цепей управления. Либо высохшие конденсаторы в источниках питания каналов. Еще импульсы должны иметь задержку на открывание это делается для того, чтобы не случилось сквозного тока в инверторе. Чтобы верхний и нижний транзисторы не были открыты одновременно. Поэтому есть время задержки на открывание транзисторов для того, чтобы другой транзистор успел закрыться. Так, например, фирма Siemens в своих приводах обычно использует большое количество импульсных трансформаторов, а цепи формирователей делает на простых компонентах транзисторах и диодах. При этом из-за применения большого количества деталей в каналах силовых транзисторов общая схема получается довольно громоздкой. Но уже давно разработаны специализированные микросхемы формирователей импульсов, в которых учтены все эти нюансы с фронтами и питанием. Такие микросхемы формирователей импульсов называются

драйверами. Рассмотрим работу микросхемы IR2101S которая компактна и охватывает работу сразу двух силовых транзисторов верхнего и нижнего. Таким образом, для работы инвертора требуется всего 3 таких микросхемы.[27]

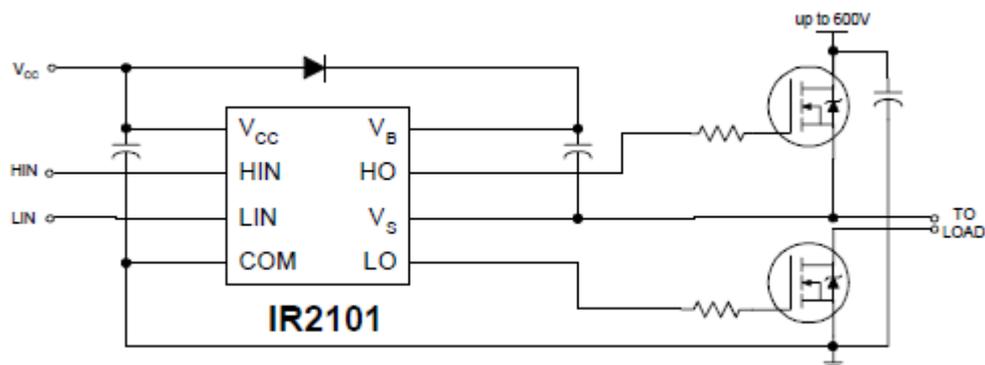


Рисунок 2.2.1 стандартная схема подключения драйвера IR2101 [5]

Из (рис. 2.2.1) видно, что микросхема запитана напряжением $V_{CC} - COM$, которое должно быть в диапазоне 10-20 Вольт. Имеет два входа HIN и LIN соответственно входа управления для открывания верхнего и нижнего транзисторов с напряжением логической единицы 3.3 - 5 -15 вольт. Выходов, HO и LO соответственно. Выходы на затворы верхнего и нижнего транзисторов, их функциональная схема изображена на (Рис. 2.2.2). И 2 входа V_B и V_S которые являются входами напряжения источника питания верхнего транзистора, о работе которого было написано ранее. Из функциональной схемы видно, что благодаря входам V_B и V_S управление верхним и нижним транзисторами гальванически развязаны. И для открывания и закрывания верхнего транзистора необходимо на них подавать напряжение. Для коммутации нижнего транзистора использовано напряжение V_{CC} . Рассмотрим запитку V_B и V_S в их цепи стоят конденсатор и диод. Которые и образуют источник питания верхнего транзистора. Для работы биполярного силового транзистора такой драйвер не подойдет, а для управления MOSFET

транзистором данная схема оптимальна. Затвор MOSFET транзистора

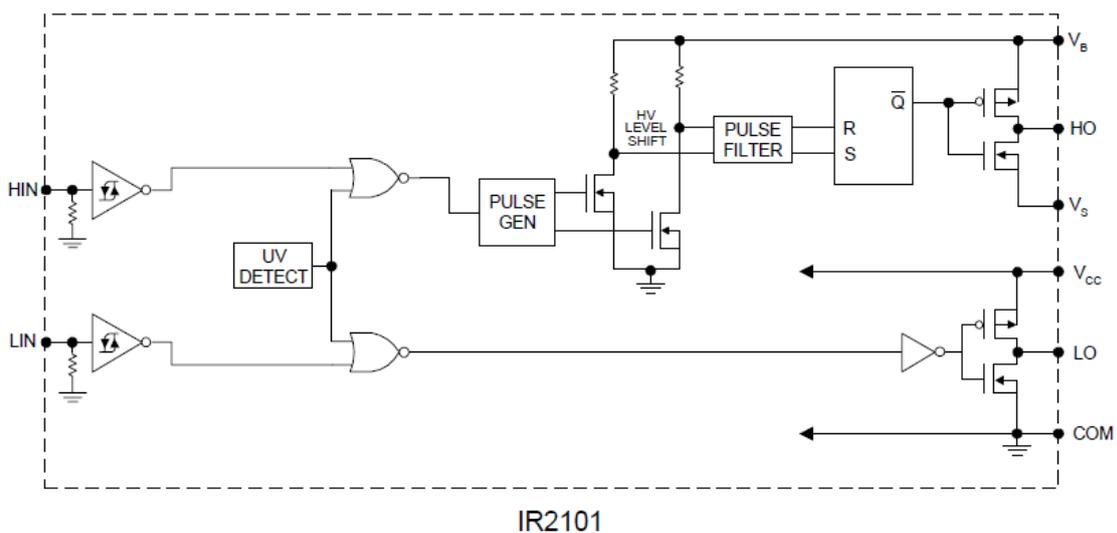


Рисунок 2.2.2 Функциональная схема драйвера IR2101 [5]

изолирован от цепи стока и истока, а для открывания транзистора нужно напряжение в цепи затвор сток. От источника питания VCC через диод, через открытый нижний транзистор заряжается конденсатор цепей V_B и V_S и при появлении импульса управления HIN (Рис.2.2.3) нижний силовой транзистор закроется, а верхний через выдержку времени, изображенную на (Рис.2.2.4) а)

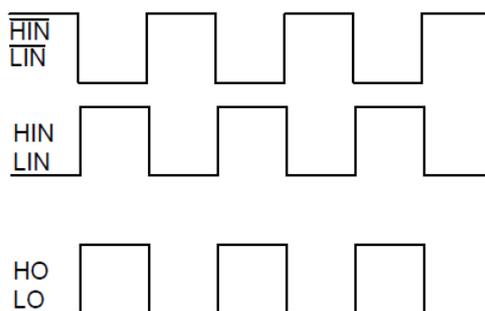


Рисунок 2.2.3 Подача управляющих импульсов HIN LIN и появление выходных импульсов HO LO [25]

откроется, благодаря заряду конденсатора в цепи V_B и V_S . Однако есть еще один момент, который бросается в глаза при детальном рассмотрении функциональной схемы. Это импульсный генератор Pulse Gen. Наличие этого

генератора говорит о том, что верхние транзисторы всегда будут работать в импульсном режиме и просто физически не смогут быть открытыми длительное время. Но для работы двигателя это подходит. Итак, основные достоинства данной схемы это компактность, экономичность т.к. не требуется проектировать источники питания в каждом канале, как это принято в классической компоновке.[27]

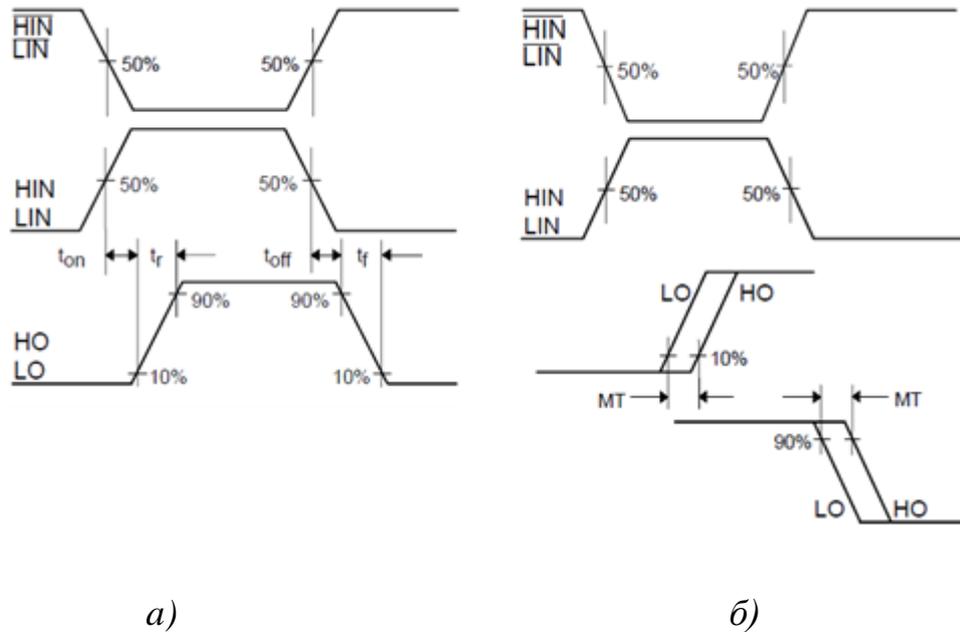


Рисунок 2.2.4 а) временные задержки между входными (HIN LIN) и выходными импульсами (HO LO) б) задержка MT [5]

Временные задержки изображенные на (Рис.2.2.4) t_{on} , t_r , t_{off} , t_f , MT имеют ограниченную величину и составляют (см. таблицу 2.2.1) определенное время.

Таблица 2.2.1 Временные задержки при (V_{CC} , V_B и V_S)=15V $C=1000pF$ $T=25^{\circ}C$ [5]

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	—	160	220	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		$V_S = 600V$
t_r	Turn-on rise time	—	100	170		
t_f	Turn-off fall time	—	50	90		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	50		

2.3 Выбор контроллера

Современные приводы представляют собой силовой модуль, драйвер, для качественного открывания и закрывания модуля, источник питания и микроконтроллер, который должен отвечать огромному количеству разных требований. Обеспечивать достаточное быстродействие, чтобы иметь возможность, перерабатывая огромное количество информации, успеть отключить, заблокировать, подачу импульсов для коммутации силового модуля. Вовремя, отслеживая при этом положение вала электродвигателя. Раньше схему регулятора строили на транзисторах, позднее на операционных усилителях, а теперь регулятор принято программировать. Программа в микроконтроллере отвечает за всё, за правильную работу силового модуля, и подачу импульсов, следит за величиной питающего напряжения, и тока, логикой управления, состоянием кнопок, защитными функциями, обеспечивать удобную диагностику неполадок и связь с устройствами НМІ (Human Machine Interface) человеко- машинного интерфейса. Вот далеко не полный список требований, предъявляемых современным микроконтроллерам. А еще им необходимы электромагнитная совместимость и гальваническая развязка цепей управления от цепей питания, чем обычно пренебрегают недобросовестные производители в погоне за экономией и выгодой.[19,30]

В 2013 году в городе Ганновер, в Германии на выставке была представлена модель 9ти осевого станка выполненного на микроэлектродвигателях фирмы Faulhaber, каждый двигатель был вентильным, с инкрементным датчиком положения ротора, возможностью векторного управления, а это значит, что момент на валу такого двигателя должен быть ощутимый... Каждый двигатель вращался по заданной программе и показывал чудеса точности и синхронизации, за двигателями следила система управления организованная на контроллере BECKHOFF и весь стенд легко размещался на столе и занимал очень мало места. Все двигатели были подключены к 2м двухпроводным шинам, одна представляла собой шину питания 24 вольта, другая была CAN шиной. Идея управлять двигателями по сетевому протоколу

не нова и существует масса разновидностей такого рода шин, RS485, RS232, Profibus, Profinet. И идея встраивать привод в двигатель тоже. Раньше были реализованы, например, такие частотные привода как Lenze, серии motec 8200 и MoviMot от Sew Eurodrive.[31]

Новым стало то, что привод, двигатель и система управления, которые раньше размещались внутри громоздких шкафов управления и требовали определенных правил подключения кабелей, вентиляции, миниатюризировались настолько, что система управления 9ти осевого станка вместе с контроллером и 9ю двигателями теперь помещается в коробку от обуви. Это стало шоком. Я лично не знаю ни одного Российского аналога данной системы. При этом появилась простота обслуживания, если какой-то из двигателей по какой-то причине не будет работать - его может заменить любой электрик или слесарь, снять двигатель и отключить разъем, вот и все действия с ним. Система диагностики тоже имеется и на небольшом экране контроллера BECKHOFF с высокой точностью будет указано, какой именно двигатель перестал работать и по какой причине. Но эта мнимая простота коварна. Аналогов такому двигателю нет. А такой двигатель стоит около 3000 евро.[16] Российских аналогов, повторяюсь, пока не встречал. Есть такое устройство фирмы Festo, но там двигатель немного крупнее. Отремонтировать такой двигатель смогут не во всех сервисных центрах. Даже если на вид внутри всё в порядке. Для квалифицированного ремонта и обслуживания потребуется специализированное оборудование. И специалисты. А все проблемы, как правило, кроются в неумении тестировать такие устройства.[15]

Контроллер DSP56F803BU80E фирмы Freescale Semiconductor выпускается в корпусе 100 LQFP Low Profile Plastic Quad Flat Pack (LQFP) и имеет 100 выводов. Рассмотрим их предназначение с целью выяснения технических характеристик. Контроллер запитывается посредством подачи питания 3.3-3.6V на выводы VDD и VSS расположенные по периметру контроллера: 6 выводов VDD и 6 выводов VSS. (Рис. 2.3.1)

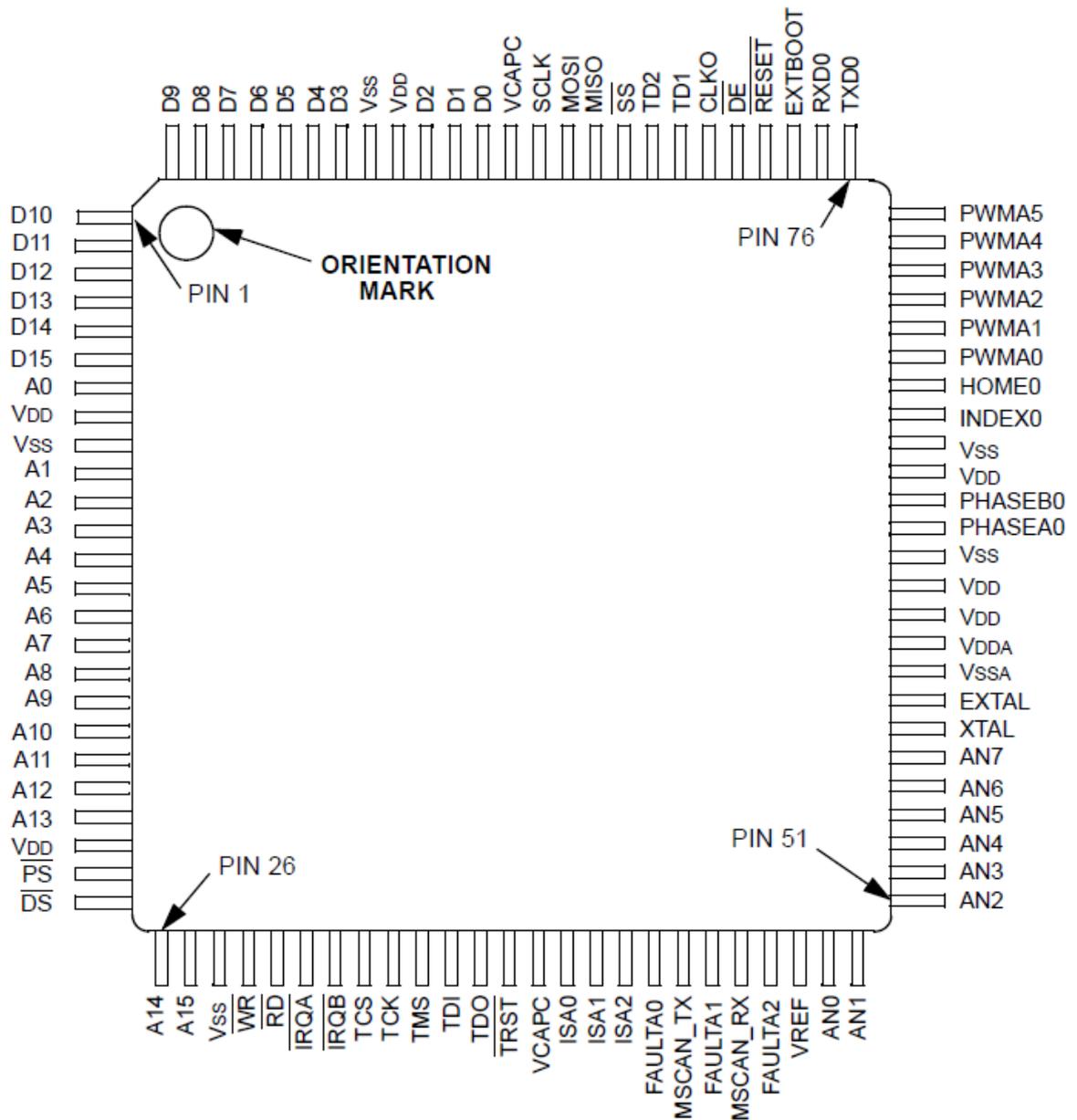


Рисунок 2.3.1 Расположение выводов контроллера в корпусе 100 LQFP [6]

Выводы VDDA и VSSA служат для подачи питания в аналоговую часть контроллера и должны быть запитаны от низкошумящего источника питания напряжением 3.3V. Вывод TCS является технологическим и для нормальной работы контроллера в схемах должен быть соединен с VSS. Для работы ядра микроконтроллера требуется подключение конденсаторов 2.2 МкФ или более на 2 вывода VCAPS. Выводы XTAL и EXTAL требуются для подключения кварцевого резонатора частотой 8 МГц, для работы контроллера и узла PLL в

котором собран генератор тактовой частоты CLOCK GEN. Вывод CLCK0 является выходом и служит для подачи импульсов внешней периферии. В нашей схеме он использоваться не будет. На (Рис. 2.3.2) изображена схема подачи питания контроллеру и подключение кварцевого резонатора на 8.0 МГц.[17]

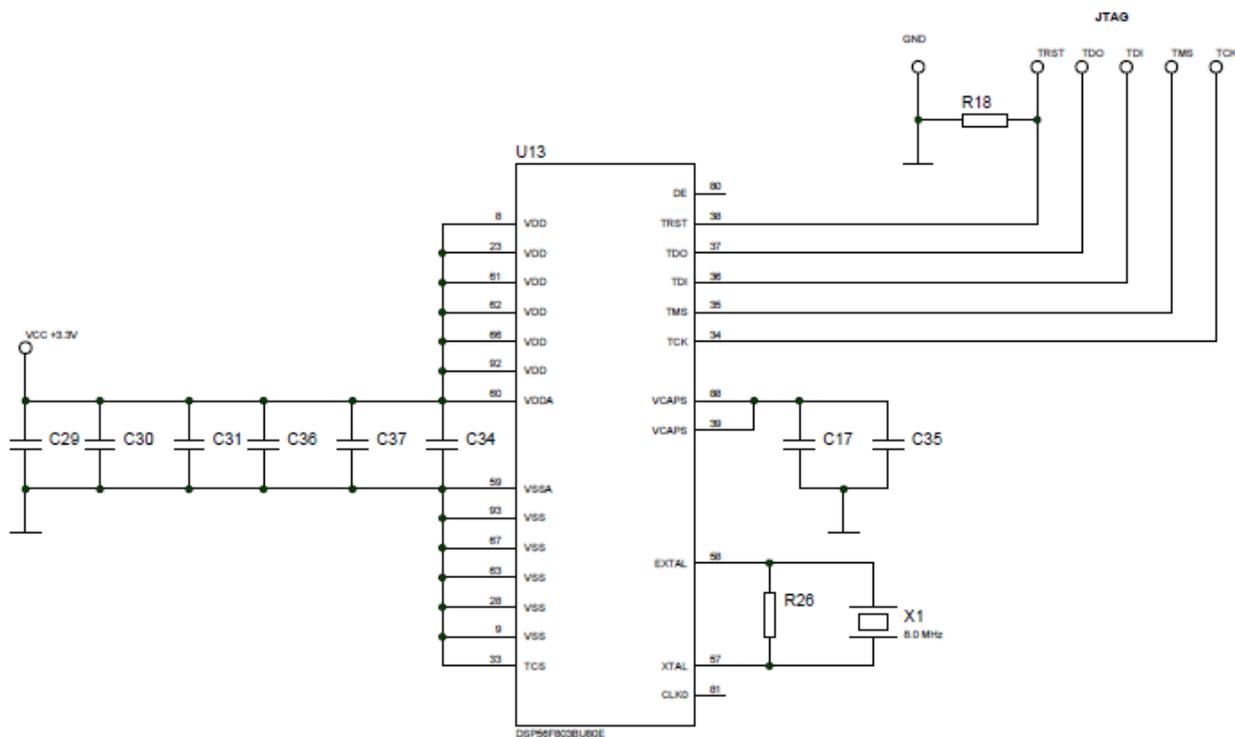


Рисунок 2.3.2 схема подключения питания, тактового генератора и отладочного разъема интерфейса JTAG микроконтроллера DSP56F803BU80E

Для программирования микроконтроллера, тестирования и отладки используется интерфейс JTAG, работу которого мы рассмотрим позднее. Для работы ему нужны выводы TCK, TMS, TDI, TDO, TRST, DE. Эти выводы стараются вывести на разъем для подключения JTAG преобразователя.

На (Рис. 2.3.3) изображена структура микроконтроллера, из которой видно, что в нем есть 6 выводов PWM (Широтно-импульсной модуляции) для подключения схемы формирователей импульсов 8 аналого-цифровых входов и вывод для подачи опорного напряжения VREF. На аналоговые входа заведем сигналы контроля напряжения питания, контроля температуры, через

специальную схему преобразователя тока будем контролировать потребляемый двигателем ток. Сигналы с фаз магнитного датчика положения ротора На, Нв, Нс также заведем на аналого-цифровые входы. Для отслеживания положения ротора. И конечно же аналоговый вход для изменения скорости вращения в ручном режиме. Работу интерфейсов (SCI и SPI) рассматривать не буду, они в нашей схеме не потребуются. Оговорюсь лишь, что SCI (Serial Communications interface) с выводами TXDO и RXDO может быть использован для подключения к компьютеру через RS232. SPI (Serial Peripheral interface) с выводами SS, MISO, MOSI, SCLK служит для последовательного приема и передачи данных различным цифровым устройствам.[31]

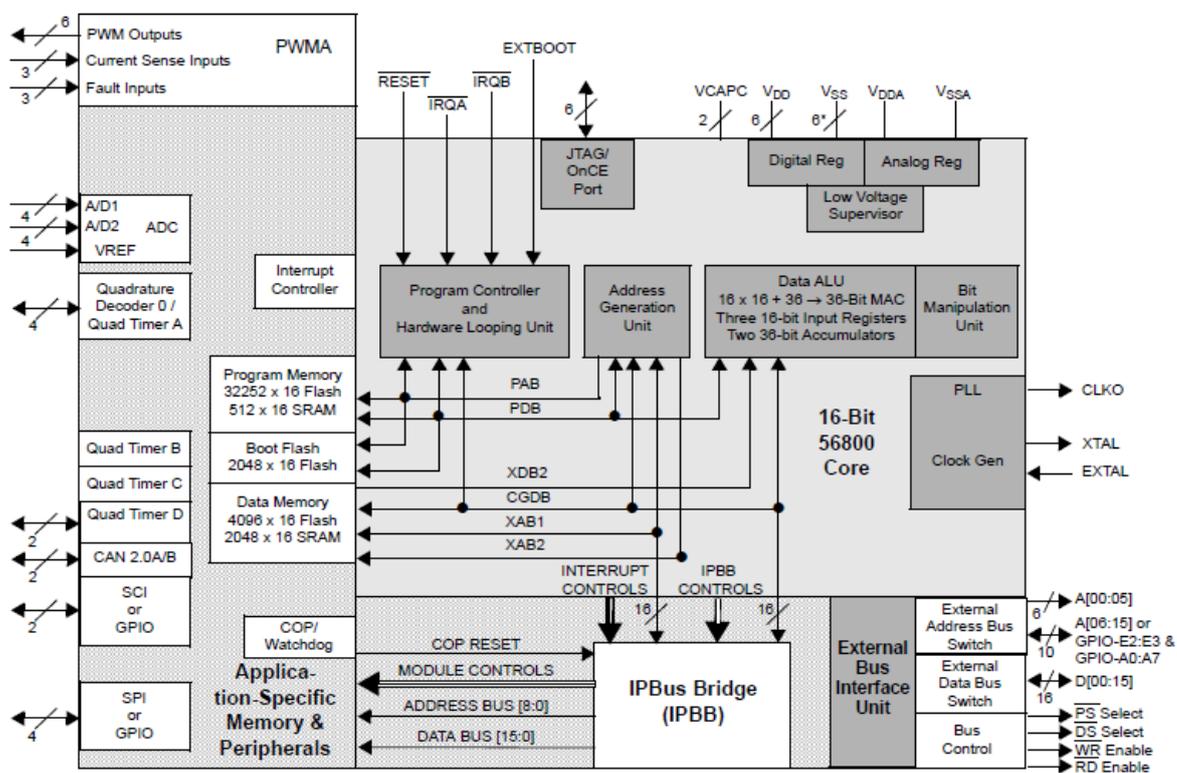


Рисунок 2.3.3 Функциональная схема контроллера DSP56F803BU80E [6]

Выводы ISA0-2 служат для входа информации о токе в фазах двигателя, а FaultA0-A2 служат для сигнализации об ошибке от специальной микросхемы-драйвера, которая отслеживает состояние выходных ключей и в случае возникновения неисправности, выдает сигнал об ошибке. В нашей схеме все

эти сигналы использоваться не будут, поэтому на них должен быть подан сигнал GND.

2.4 CAN (Control Area Network)

Современное оборудование с каждым годом усложняется, и те достижения инженерной мысли, которые демонстрируют иностранные фирмы, могут обернуться для производителей длительным простоем оборудования. Применение CAN шины в автоматизации имеет сплошные плюсы – это и возможность минимизировать количество проводов, и обеспечение скорости передачи до 1 Мбит в секунду, хотя эта величина падает с удаленностью (ростом длины кабеля связи). Возможность контролировать качество передачи данных, используя контрольную сумму, хорошая помехозащищенность. Однако, есть и недостаток. Для качественного обслуживания данного вида устройств, требуются квалифицированные специалисты. Причем, даже эти специалисты могут оказаться не компетентными при возникновении каких-либо неисправностей. С одной стороны все просто. Неисправный узел, если у него нет проблем с питанием и он не выжигает силовой предохранитель в 90% случаев сам сообщит системе управления о своей неисправности, или система управления не получив «длительное» (несколько миллисекунд) время сообщит пользователю о неисправности CAN шины или неисправности устройства. А от ремонтного персонала потребуются заменить неисправный узел на исправный и запустить оборудование в работу. Но вот беда, если эти узлы начнут выходить из строя один за другим, что делать тогда? Вызывать фирму изготовителя? А если эти неисправности были сделаны, намерено, программно, например, после нескольких миллионов или миллиардов циклов работы. Современные фирмы изготовители уже давно придумали встраивать такие счетчики, якобы для улучшения качества и надежности оборудования. Известны случаи, когда исправные копиры переставали работать пока не вызовут сервисного специалиста, который после профилактики должен сбросить программный

счетчик нажав секретную комбинацию на клавиатуре. Или источники бесперебойного питания, программно начинали выдавать ошибки аккумулятора, хотя его уже поменяли на новый. Вот и получается, что оборудование, в котором применяется CAN шина должно обслуживаться компетентными специалистами. Иначе начнутся длительные простои. Вызвано это будет тем, что привезти необходимые запчасти из Европы помимо того, что стоит много денег, еще и требует длительного (2-4 недели после заключения контракта) времени. Должен быть еще выход, например, пытаться подобрать аналоги. Но это так же задача трудоемкая и в 90% случаев не решаемая из-за отсутствия информации, чаще всего программного обеспечения. Ведь если программное обеспечение станка обслуживающий персонал при запуске оборудования наверняка записал в архив и с каждым циклом ППО (планово-предупредительного обслуживания) ее переписывает или сверяет, то программное обеспечение микроконтроллера (микросхемы) никакая фирма никогда не предоставит. А прошивка микроконтроллера может измениться. Чаще всего это случается из-за перепадов питания, вследствие высыхания электролита в электролитических конденсаторах, или частого включения выключения. Именно для таких случаев и требуется иметь качественные знания о работе CAN шины, чтобы суметь разобраться в причинах вызвавших неисправность и по возможности эту причину устранить. [20]

CAN шина была разработана фирмой BOSCH в 1980 годы. Её разрабатывали как автомобильную шину для того, чтобы упростить электрику автомобиля. Позднее ее стали применять в ткацких станках и таким образом началось применение CAN в автоматизации и в промышленности. Позднее это направление распространилось и на железнодорожный транспорт, авиацию и кораблестроение.[8]

Рассмотрим работу протокола CAN шины. Протокол стандартизован, есть национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 11898-1-2015 МЕСТНАЯ КОНТРОЛЛЕРНАЯ СЕТЬ (CAN).

На (Рис. 2.4.1) изображена CAN шина с подключенными к ней устройствами. Устройства исполнители пронумерованы. Сделано это для определения приоритета по возрастанию. Наиболее важное устройство – это устройство с номером 1 и по убыванию важности до 126.

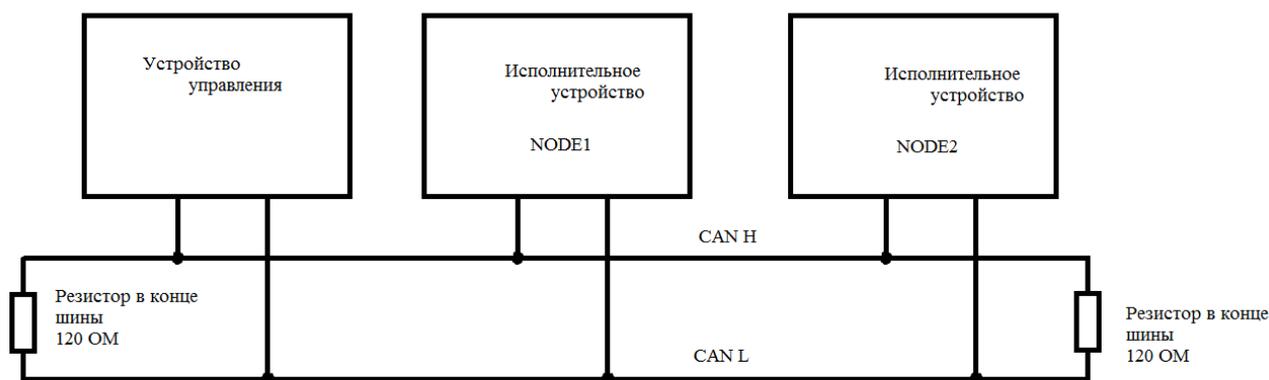


Рисунок 2.4.1 Топология CAN шины.

Устройством управления может быть что угодно, программируемый контроллер, операторская панель или USB- CAN преобразователь. Основное условие – это возможность устройства поддерживать протокол CAN –OPEN. Для снижения помех в шине ее выполняют витой парой (двумя проводами свитыми вместе) на концах проводов устанавливают терминаторы – резисторы сопротивлением 120 Ом. Иногда эти резисторы встраивают в разъемы или в сами устройства. Они исключают возможность наводки помех в проводах и улучшают помехозащищенность шины к электромагнитным помехам. По шине постоянно происходит «общение» управляющего устройства с устройствами исполнителями. Они обмениваются пакетами импульсов, называемыми (телеграммами) кадрами, фреймами (Frame). Длительность этих кадров зависит от установленной скорости передачи данных. Обычно скорость выше, чем ближе устройства друг к другу, чем короче шина. И скорость передачи данных снижается с увеличением расстояния между устройствами. В табл. 2.4.1 указано изменение скорости передачи данных с удаленностью устройств.

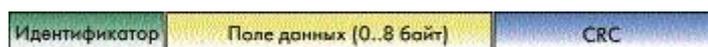
Скорость передачи данных меняется от 1Мбит/с, 500Кбит/с, 250 Кбит/с. Но витая пара – не является панацеей, CAN протокол можно реализовать и на оптоволокне.

На данный момент широко используются 2 типа CAN шины. CAN2.0 А – так называемый стандартный (или базовый) и CAN2.0 В – расширенный.

Таблица 2.4.1 Значения максимальной длины шины

Скорость передачи данных, кБит/с	Максимальная длина шины, м (футы)
50	1000 (3280)
125	500 (1640)
250	250 (820)
500	100 (328)
1000	20 (65)

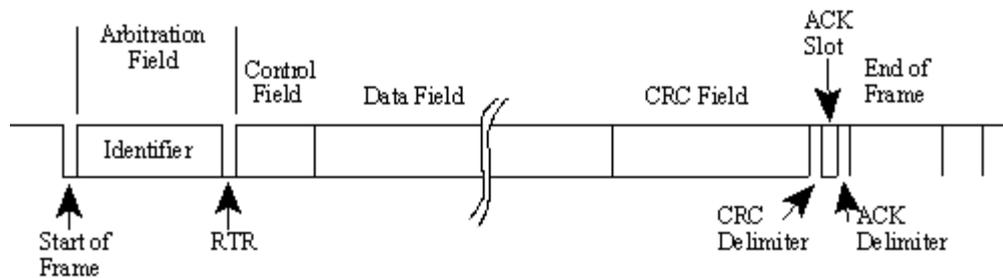
Отличаются они количеством бит идентификатора. В CAN 2.0 А используется 11 битный идентификатор, а в CAN2.0 В 29 битный идентификатор. Что это значит, показывает (Рис. 2.4.2). Поле идентификатора изменяется и становится шире.



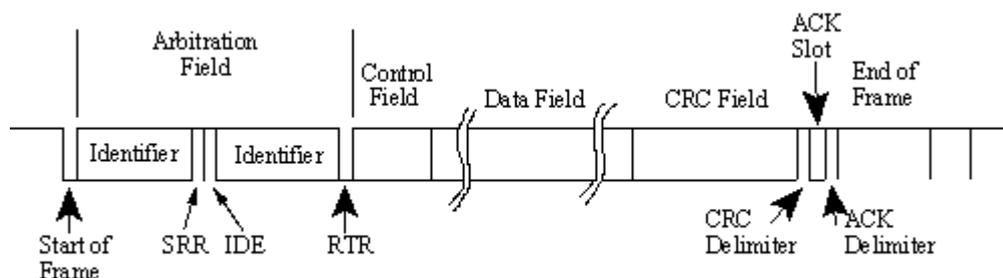
а)



б)



б)



в)

Рисунок 2.4.2 а)упрощенный кадр данных (Data Frame); б) кадр данных с логического анализатора; в) кадр протокола CAN2.0 А; г) кадр протокола CAN2.0 В

Рассмотрим состав кадра CAN 2.0 А (Рис. 2.4.2 г)) внимательно.

Sof (Start of Frame) его еще называют начало кадра. Представляет собой доминантный бит. В CAN протоколе доминантным называют состояние логического 0, а состояние логической 1 – рецессивным битом.

Identifier – идентификатор в нем указываются те самые 11 бит. Он складывается из сочетаний (Код+NODE) Это значит, что если мы хотим послать 2му исполнительному устройству (двигателю) кадр сообщение с набором команд, например 300, то для кадра 1го двигателя идентификатор будет 301, а для второго 302. Или получив от двигателя идентификатор 714, мы понимаем, что это отозвался двигатель с номером 14. И в случае, если два исполнительных устройства одновременно начнут передачу своих кадров, то на

шине останется сообщение от того, который имеет более высокий приоритет, в данном случае 302 приоритетнее, чем 314. При этом устроено все довольно просто. Рассмотрим (Рис. 2.4.3) на нем изображено, как узел В проигрывает арбитраж и переходит в рецессивное состояние. Это связано с тем, что у узла В номер NODE оказался больше чем у узла А.

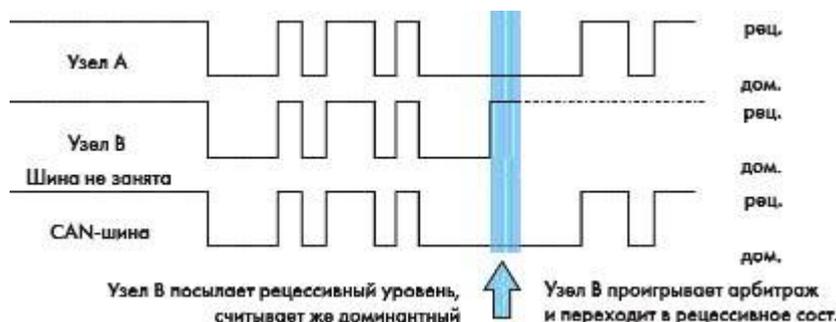


Рисунок 2.4.3 арбитраж исполнительных устройств

Однако полем арбитража является не только идентификатор identifier, оно еще состоит из бита RTR он должен быть доминантным и как бы разграничивать, отделять поле ID сокращенно от identifier от поля контроля и поля данных.

Поле контроля Control Field, состоит из бти бит.

Поле данных Data field в зависимости от сообщения может достигать 64 бит. Далее идет CRC field, которое является контрольной суммой и служит для контроля качества сообщения.

Поле АСК является полем подтверждения приема и имеет длину в 2 бита и должно состоять из интервала и разделителя. Передающий кадр узел устанавливает в этом поле 2 рецессивных бита (состояние лог.1), а принимающий после получения кадра и сверки поля данных и поля контрольной суммы переписывает эти биты доминантными. Так передающее устройство понимает, что кадр дошел до получателя и дальше выдает 7 рецессивных битов в поле EOF end of frame. Так обозначается окончание кадра. И это является сигнализацией, что линия свободна для передачи следующего

кадра. В противном случае, если биты АСК останутся нетронутыми (рецессивными) сообщение будет перепослано еще раз и еще, оно заикнется.

Итак, внимательно рассмотрев структуру кадра становится ясно, что по CAN шине даже в базовом варианте передается очень большое количество информации и при том за считанные миллисекунды. Расшифровывать эти сообщения конечно же можно при помощи некоторых осциллографов (современные осциллографы фирмы TEKTRONIX имеют возможность расшифровки CAN телеграмм) некоторые логические анализаторы так же имеют такую возможность. Но для нормальной работы с устройствами, связанными по CAN шине потребуется другое устройство. Которое само могло бы принимать, передавать, расшифровывать и сохранять листинг, на базе микроконтроллера. Т.к. расшифровывать сообщения полученные даже логическим анализатором долго и неудобно. А о передаче CAN телеграмм вообще и речи не идет.

2.5 Преобразователь USB – CAN

Для того чтобы иметь возможность изучать CAN телеграммы необходимо иметь устройство, позволяющее читать сообщения, которыми обмениваются устройства по CAN шине. Я в своих изысканиях использую самодельное устройство, изображенное на (Рис. 2.5.1). Схема данного преобразователя находится в приложении 1. Это полностью самодельное устройство, собранное своими руками моим товарищем и главным специалистом ПАО АВТОВАЗ Пугачевым О. Устройство удобно в эксплуатации, компактно, позволяет читать телеграммы CAN типа 2.0 PartA /PartB. Посылать сообщения устройствам находящимся на CAN шине. Именно с его помощью я имею возможность отлаживать работу исполнительных устройств типа электродвигателя по CAN шине.

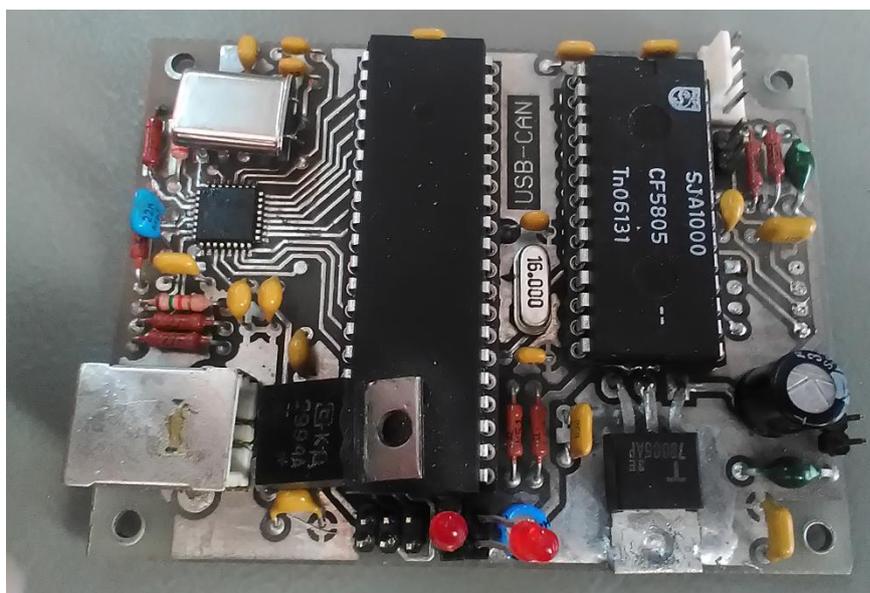


Рисунок 2.5.1 USB – CAN преобразователь

Преобразователь собран на 3х основных микросхемах ATMEGA 162-16, SJA1000 и FT245BM, а также добавлена EEPROM 93LC46B/SN и микросхема PCA82C250, которая является преобразователем уровней сигналов или иначе драйвером. Микросхема FT245BM представляет собой преобразователь USB FIFO I.C. или иначе преобразователь USB в виртуальный COM порт. SJA1000 - это CAN контроллер, а ATMEGA 162-16 –это 8ми битный программируемый микроконтроллер. Для работы этого устройства необходима прошивка, которая доступна на сайте <https://www.mictronics.de/projects/usb-can-bus>. Работает данное устройство с программами CANHacker или CANControl, которые также доступны в интернете бесплатно.

Рассмотрим листинг CAN сообщений, которые были получены мной с работающего оборудования для расшифровки.

Таблица 2.5.1 Пример считанных с помощью USB-CAN преобразователя данных.

ID	Кол-во байт данных	Данные							
714	1	05							
314	5	3A	01	00	00	00			
494	8	02	00	FA	FF	00	00	04	00
314	5	3A	00	00	00	00			
494	8	02	00	F9	FF	00	00	04	00
314	5	3A	01	00	00	00			
494	8	02	00	F8	FF	00	00	04	00
314	5	3A	00	00	00	00			
494	8	02	00	F8	FF	00	00	04	00
314	5	3A	01	00	00	00			

За 20 секунд работы оборудования по CAN шине было передано такое количество информации, что при попытке сделать бумажную распечатку мелким шрифтом компьютер выдал 400 страниц на формате А4. Для сортировки полученных данных я использовал программу EXEL. И ее возможность использования фильтров. Записав полученный массив данных в таблицу, и разделив данные по ячейкам, становится видна структура передачи кадров, в которой видно поле identifier – ID – идентификатора и поле данных, с указанием количества байт. Выделив сообщения относящиеся к устройству NODE 14 я получил таблицу 2.5.1, в нее сведена лишь малая часть тех сообщений, которые были в шине за 20 секунд времени, но я постарался выделить все идентификаторы. Именно с них начнется расшифровка сообщений.

2.6 Стандарт CIA 402

После изучения структуры кадра CAN протокола становится понятно, что протокол является инструментом высокоскоростной и очень точной передачи огромного количества данных. Которые к тому же имеют возможность контролировать обратную связь получения этих данных исполнительным

устройством или устройством управления. Таким образом, можно предположить, что производители оборудования при проектировании своих устройств могут для своего устройства создать свой стандарт. По которому чисто условно задать, что по такой-то команде (зашифрованной в 64 битах поля данных) устройство будет выполнять одни команды, а по другой – другие. А другой производитель подобного устройства сделает все по-своему. В результате получится хаос. По началу, наверное, так и было. Но потом производители были вынуждены договориться о создании стандартов. И каждое устройство получило свой стандарт. СIA расшифровывается как CAN in automation. А конкретно по управлению электроприводами используется стандарт СIA 402.

Что потребуется для управления электроприводом по такому стандарту и что нужно сделать, чтобы начать управлять двигателем по CAN шине.

В приложении 4 описан пример подключения привода Copley Controls и панели оператора WAGO perspecto 762-3035 по протоколу CAN-OPEN с использованием библиотеки СIA402.

Для расшифровки кадров необходимо понять, какие они бывают и для чего используются.

Для получения доступа к устройствам CAN шины используются 2 способа. Посредством объекта служебных данных или иначе SDO (Service Data Object) и объекты данных процесса PDO (Process Data Object) в свою очередь количество PDO может быть задано хоть до 11 и может быть определено пользователем, а SDO всегда один. Другими словами PDO и SDO это заданный набор зашифрованных команд. Эти наборы команд подразделяются на те которые передаются и те, которые принимаются. При этом принято добавлять буквы T и R (Transmitter) и (Receiver) соответственно получается TSDO , RSDO или TPDO , RPDO. Каждый набор имеет свой идентификационный номер ID, который складывается из кода TSDO и знакомого нам номера NODE

(номера исполнительного устройства). В таблице 2.6.1 указаны номера ID с расшифровкой к какому набору команд они относятся.

Таблица 2.6.1 Наборы команд с привязкой к ID

Сервис (набор команд)	Диапазон возможных ID+NODE	Индекс параметризации
Сервис NMT	000h	-
Сервис синхронизации SYNC	080h	1005h
Сервис аварий EMCY	От 081h до 0FFh	-
Передача PDO1 (TPD01)	От 181h до 1FFh	1800h, 1A00h
Прием PDO1 (RPD01)	От 201h до 27Fh	1400h, 1600h
Передача PDO2 (TPD02)	От 281h до 2FFh	1801h, 1A01h
Прием PDO2 (RPD02)	301h до 37Fh	1401h, 1601h
Передача PDO3 (TPD03)	От 381h до 3FFh	1802h, 1A02h
Прием PDO3 (RPD03)	От 401h до 47Fh	402h, 1602h
Передача PDO4 (TPD04)	От 480h до 4FFh	1803h
Прием PDO4 (RPD04)	От 500h до 57Fh	1403h
Передача SDO	От 581h до 5FFh	1200h
Прием SDO	От 601h до 67Fh	1200h
Объект Heartbeat	От 701h до 77Fh	1016h, 1017h

Рассмотрим сервис NMT

ID 000h: 2 CS ID,

где CS – спецификатор команды, а ID – номер NODE устройства для которого эта команда предназначена.

Значения CS и что они значат сведены в таблицу 2.6.2

Таблица 2.6.2 Значения CS с расшифровкой.

Возможные значения CS	Действия при их использовании
01h	Запуск_Удаленного_Узла
02h	Остановка_Удаленного_Узла
80h	Переход_в_Состояние_Готов
81h	Инициализация_Узла
82h	Инициализация_Коммуникации

Рассмотрим пример: Команда перехода в состояние готовности к работе (Переход_в_Состояние_Готов = 80h) преобразователя частоты Altivar, имеющего адрес 4 (04h) на шине CANopen.

Для этого создается кадр:

ID 000H: 2 80 04

Получив такую команду, (надо сказать это самая важная команда, ее приоритет самый высокий у нее ID минимальный она всегда пройдет в сеть без очереди) привод с номером 04 перейдет в состояние готов как изображено на (Рис. 2.6.1)

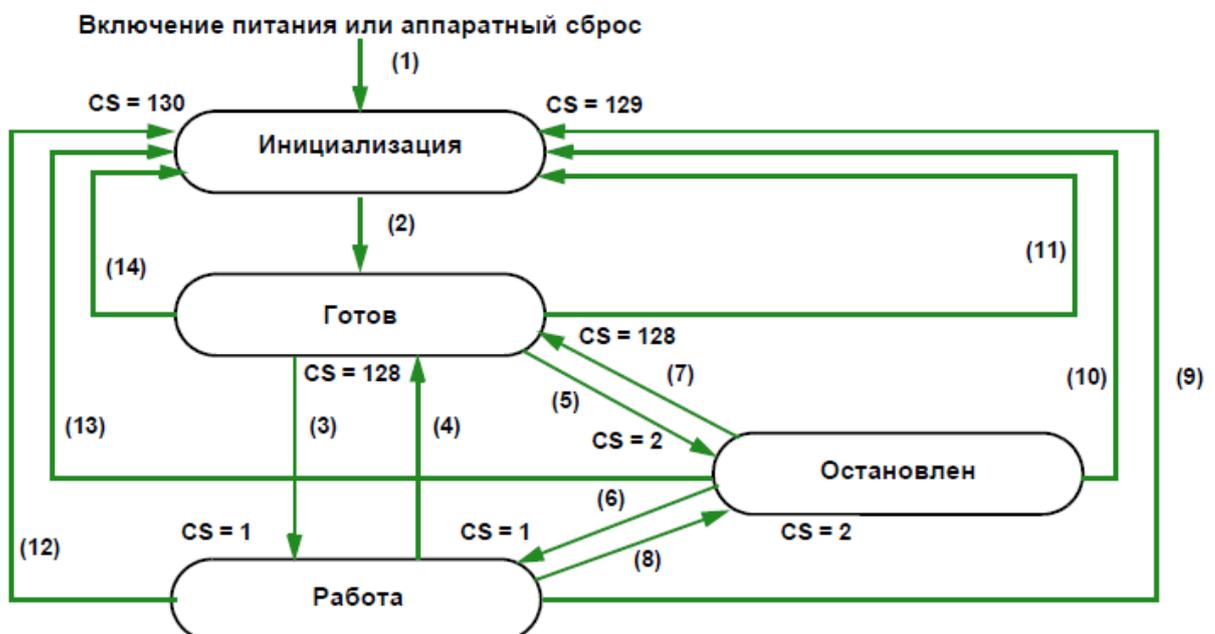


Рисунок 2.6.1 граф состояний NMT (на рисунке значение CS выражено в десятичной системе счисления, значение 128 соответствует значению 80h)

Практическое применение исследования CAN протокола и стандарта CIA402 заключается в умении управлять приводом с BLDC двигателем любой фирмы изготовителя. Различные фирмы изготовители, например, Telemechanique выпускающая привода Altivar, или Festo, или Faulhaber, применяют для управления двигателем один и тот же протокол. Но это не означает, что они все могут быть сконфигурированы как одно устройство. Для того, чтобы получился проект как в приложении 4 необходимы конфигурационные файлы .eds и файлы библиотек. И чтобы проект заработал необходимо иметь эти файлы для каждого устройства, а они не всегда могут находиться в свободном доступе. Но все-таки есть способ управлять BLDC двигателем через USB-CAN преобразователь, задавая команды. Рассмотрим пример такого использования. При подаче питания на привод в шину выдается сообщение о том, что на линии находится привод с определенным номером. В моем случае этот номер будет 14. Т. е. NODE 14. А сообщение будет

ID 714H: 1 00 Этим сообщением устройство сообщает, что на него подано питание и оно готово к дальнейшей работе.

Далее мы должны сообщить устройству при помощи USB-CAN преобразователя, связанного с устройством и программы CanHacker, что мы намерены его включить или перевести в состояние запуска

Подаем команду:

ID 000H: 2 01 14

При подаче этой команды устройство отвечает сообщением

ID 494H: 8 XX XX XX XX XX XX XX XX

Значение этих 8 байт характеризует состояние устройства, но нам оно пока не нужно.

Следующей командой мы сообщаем устройству о необходимости включить режим управления по скорости. (OP MOD1)

ID 314H: 5 FD FF FF FF FF,

где 314H означает, что мы как устройство управления подаем команду FD назначение которой в CIA 402 означает включение режима (OPMOD1) режим управления по скорости.

Теперь необходимо включить сигнал EN (enable-разрешение).

Сделаем мы это подав команду (EN)

ID314H: 5 0F 00 00 00 00,

где 0F является командой (EN)

Все подготовительные команды поданы, осталось только задать скорость с которой будет вращаться двигатель. Для этого вводим:

ID314H: 5 93 F4 01 00 00,

где 93 является командой на вращение со скоростью 01F4

Если перевести число 01F4 с шестнадцатеричной системы в десятичную, то получим значение в 500 оборотов в минуту. При этом начинает вращаться двигатель с заданными оборотами. Если изменить это число, то обороты будут меняться. А если мы захотим остановить двигатель, то нужно ввести команду

ID314H: 5 93 00 00 00 00

и двигатель перестанет вращаться, при этом сигнал EN так же пропадет.

Этот способ управления приводом универсальный и подойдет для двигателя любой фирмы изготовителя. При этом для проверки исправности не требуется тратиться на дорогостоящие контроллеры или операторские панели, не нужно искать файлы библиотек и конфигурации.

2.7 Интерфейс JTAG (Joint Test Action Group)

С развитием электроники и в частности с уменьшением ее размеров, появлением микроконтроллеров и микросхем ПЛИС возникла проблема: Выводов у микросхем много, выводы мелкие, а в микросхемах с BGA корпусом и вовсе находятся под микросхемой, щупом осциллографа не добраться, а проверить наличие контакта надо. Для этих целей и был придуман интерфейс JTAG (чтобы иметь возможность проверить наличие электрической связи и узнать в каком состоянии находится тот или иной вывод без дополнительных приборов). JTAG был разработан в 80х годах, а в 1990 появился стандарт IEEE1149.1. Одним из первых процессоров с новым интерфейсом JTAG стал процессор фирмы Intel 80486. Секрет успеха кроется в специальной архитектуре, встраиваемой в современные цифровые микросхемы. И она позволяет не только тестировать состояние выводов, но и управлять ими. За счет этой структуры производители микросхем смогли отказаться от громоздких пробников. Теперь можно проверить качество пайки микросхемы, выводы которой покрыты толстым слоем лака, его теперь не надо соскабливать и волноваться о замыкании пробником с соседним выводом. Теперь для тестирования прохождения импульсов используется программа. Программы разные и их много. Например, есть бесплатный (для ознакомления) инструмент JTAG Live Buzz. Эта программа в коммерческой версии может буквально творить чудеса, причем автоматически. Имея JTAG программатор и заведомо исправную плату можно считать состояние выводов микросхем и произведя трассировку сравнить его с неисправной. Отличия будут видны сразу, что поможет при ее ремонте. Этот принцип даже получил оригинальное название Boundary Scan в переводе на Русский язык- граничное сканирование. С помощью данного интерфейса возможно сохранить дампы памяти, считать внутреннюю flash память контроллера, или внешнюю память по определенным адресам. Для того чтобы понять как это работает, рассмотрим из каких выводов

микросхем состоит интерфейс JTAG. Назначение выводов интерфейса в таблице 2.7.1

Таблица 2.7.1 Назначение выводов интерфейса JTAG.

Вывод	Расшифровка	Назначение
TDI	Test Data Input	Последовательный входной сигнал данных, задвигаемых в регистр по переднему фронту TCK.
TDO	Test Data Output	Выход последовательных данных, выдвигающихся по заднему фронту TCK (при отсутствии передачи данных выход находится в 3-м состоянии)
TMS	Test Mode Select	Сигнал управления TAP контроллером
TRST	Test Reset	Инверсный сигнал. Работает при подаче 0, не обязателен, т.к. данного эффекта можно добиться удерживая сигнал TMS в 1 Служит для сброса TAP контроллера.
TCK	Test Clock	Тактовая частота, служит для синхронизации.
DE	Debug Event	Выходной сигнал, инверсный, служит для обеспечения низкого импульса во время режима отладки.

Теперь рассмотрим (Рис. 2.7.1) на нем изображены несколько микросхем, соединенных интерфейсом JTAG. Сигналы TDI и TDO последовательные, соответственно TDI – вход , TDO – выход. Они соединены определенным образом и составляют топологию – кольцо. А сигналы TMS и TCK заводятся в микросхемы параллельно. При использовании программы JTAG Live Buzz

микросхемы, подключенные таким способом определяются автоматически. Для правильной работы с ними может потребоваться специальный конфигурационный файл «Файл BSDL». Этот файл всегда должен находиться в свободном доступе на сайте у производителя микросхемы. В нем прописана конфигурация выводов. Однотипные микросхемы выполненные в разных корпусах могут иметь отличия в данном файле, поэтому необходимо быть предельно внимательным при выборе BSDL файла.

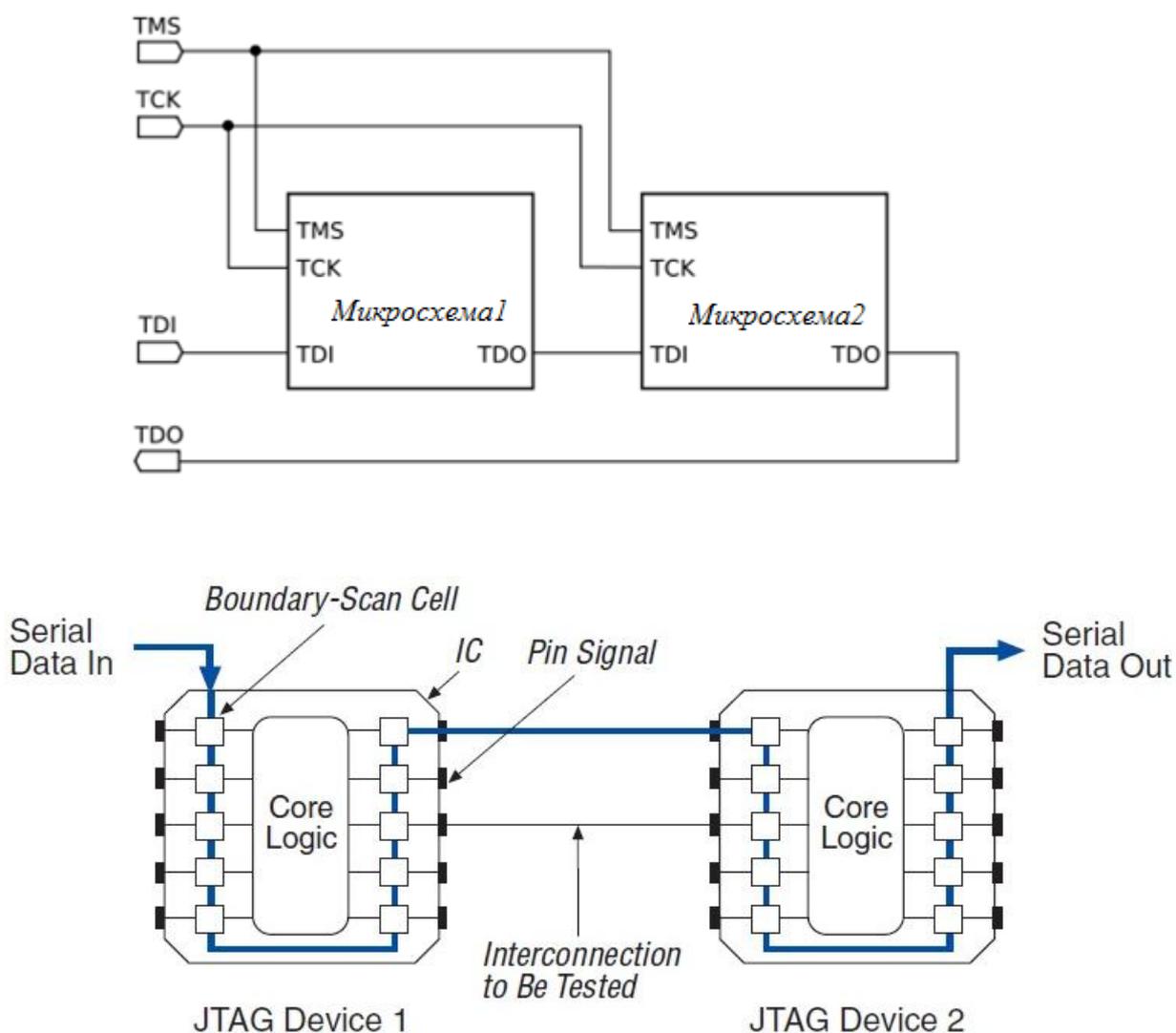


Рисунок 2.7.1 Структура последовательной передачи ячеек со сдвигом от Serial Data In до Serial Data Out через 2 микросхемы. [11]

За счет чего же стало возможным сдвигать состояние выводов и что это за встраиваемая архитектура... Рассмотрим (Рис. 2.7.2), на нем изображена

ячейка регистра сдвига. В ней есть последовательный вход и выход – это Scan In (SI) и Scan Out (SO), есть параллельные вход и выход PI и PO. Два мультиплексора, по входу и по выходу, и два D триггера, защелкивающих состояние входа по тактовым импульсам ClockDR и UpdateDR. Итак, рассмотрим работу ячейки. От ядра микроконтроллера пришел сигнал на вход PI, пока JTAG интерфейс не задействован этот вход беспрепятственно становится выходом PO с приходом команды mode. И состояние входа переписывается на выход выходного мультиплексора и потом соответственно на вывод микросхемы (Pin). Все меняется при подключении JTAG. Сигналами TMS и TCK сначала выбирается команда TAP контроллера, но об этом позже. Управление ячейкой по JTAG начинается с приходом сигнала ShiftDR, который подключает входной мультиплексор и позволяет либо передавать данные от ядра (сигнал PI), либо переписать данные от входа TDI (в случае ячейки это SI). Дальше с приходом тактового импульса TCK (ClockDR) происходит защелкивание триггера и данные либо переходят дальше на выход SO и соответственно потом к следующей ячейке, пока не достигнут выхода TDO, либо если наша цель «поиграть» выходом на выводе Pin (после включения соответствующей команды на TAP контроллере и приходом сигнала UpdateDR) вывести состояние выхода SO через D триггер и выходной мультиплексор на выход PO и соответственно изменить состояние вывода микросхемы Pin.

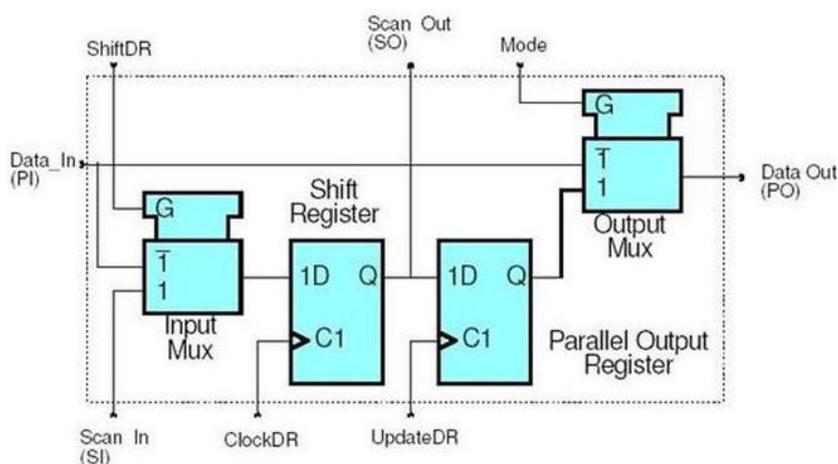


Рисунок 2.7.2 Структура ячейки регистра сдвига [11]

Следующий (Рис. 2.7.3) демонстрирует структурную схему, где элемент с названием порт для тестирования, как раз является TAP контроллером. Выбранная команда с автомата переключения записывается в регистр IR (инструкция, команда) при помощи дешифратора происходит расшифровка выбранной команды и выбор исходя из состояния регистра IR соответствующего регистра данных. Регистров много, самый короткий BYPASS (регистр обхода), остальные выбираются исходя из поставленных задач. Их состояние (последовательный код) передается дальше через мультиплексор к следующему мультиплексору и с тактовыми импульсами появляются на выходе TDO.

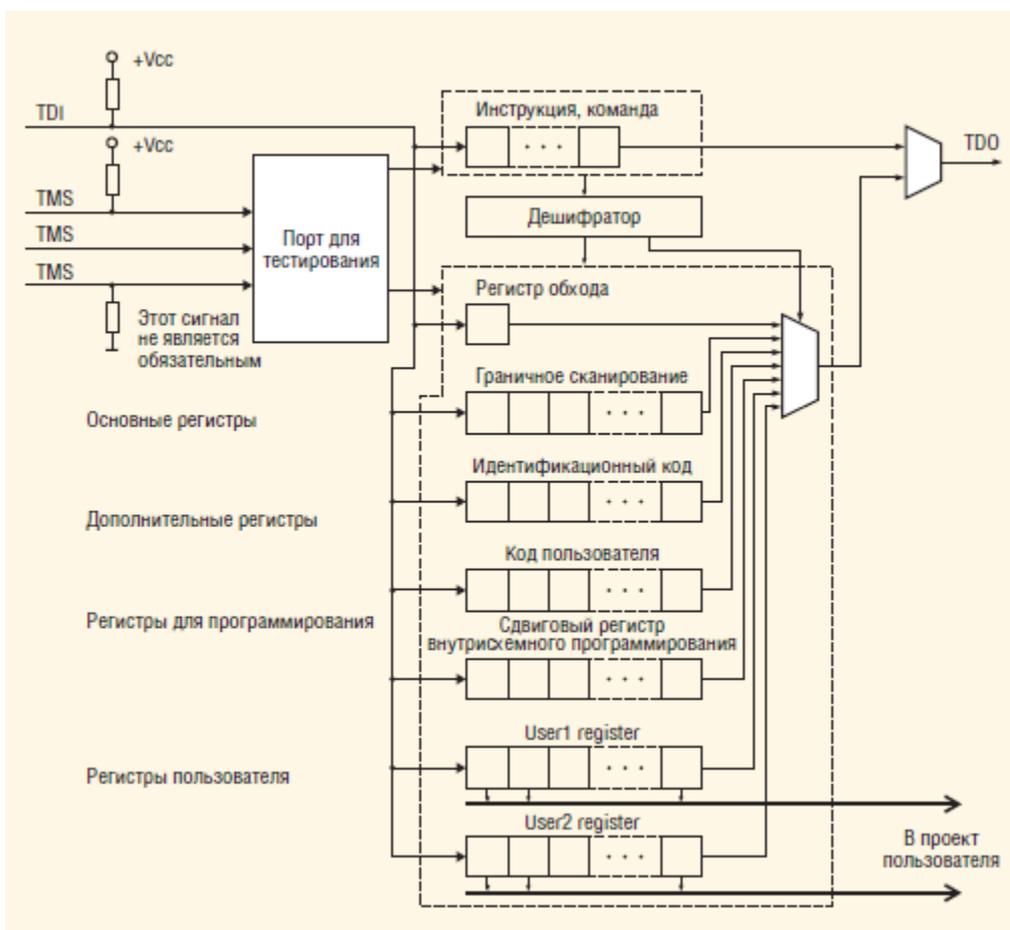


Рисунок 2.7.3 Структурная схема интерфейса JTAG [10]

Основные инструкции с их расшифровкой для чего они используются, представлены в таблице 2.7.1

Таблица 2.7.1 Основные инструкции обязательные при использовании в микросхемах с JTAG интерфейсом. [11]

EXTEST	инструкция, позволяющая за счет установки логических значений на рабочих контактах электронных компонентов проверить внешние цепи, имеющие непосредственное отношение к тестируемому компоненту
INTEST	инструкция обеспечивает возможность установки логических значений внутри микросхемы, то есть на входах ядра, тем самым проверяя его.
SAMPLE_PRELOAD	позволяет тестировать ядро электронного элемента в статическом режиме, устанавливая значения логических уровней на границе его выходных буферов.
BYPASS	инструкция, при которой наш регистр граничного сканирования «схлопывается» в один триггер. При этом данные со входа (TDI) на выход (TDO) передаются с задержкой в один такт частоты синхронизации интерфейса (TCK). Этот режим позволяет эффективно использовать возможности последовательного интерфейса при организации длинных последовательно объединенных цепочек.
IDCODE	инструкция выдвигает на выход значение встроенного 32-битного регистра с идентификаторами производителя, модели и версии устройства

Теперь становится понятно, как микросхемы автоматически определяются по JTAG – за счет наличия в них обязательного регистра с идентификаторами производителя.

Итак, из структурной схемы 2.7.4 видно, что автомат переключений имеет 16 состояний. Состояния сведены в таблицу 5.3. Для выбора состояний и управления автоматом переключения используются сигналы TMS и TCK, для исследований в этом направлении удобно использовать логический анализатор.

Окончания DR означает, что действия будут производиться с данными, а IR с инструкциями.

IEEE Std. 1149.1 TAP Controller State Machine

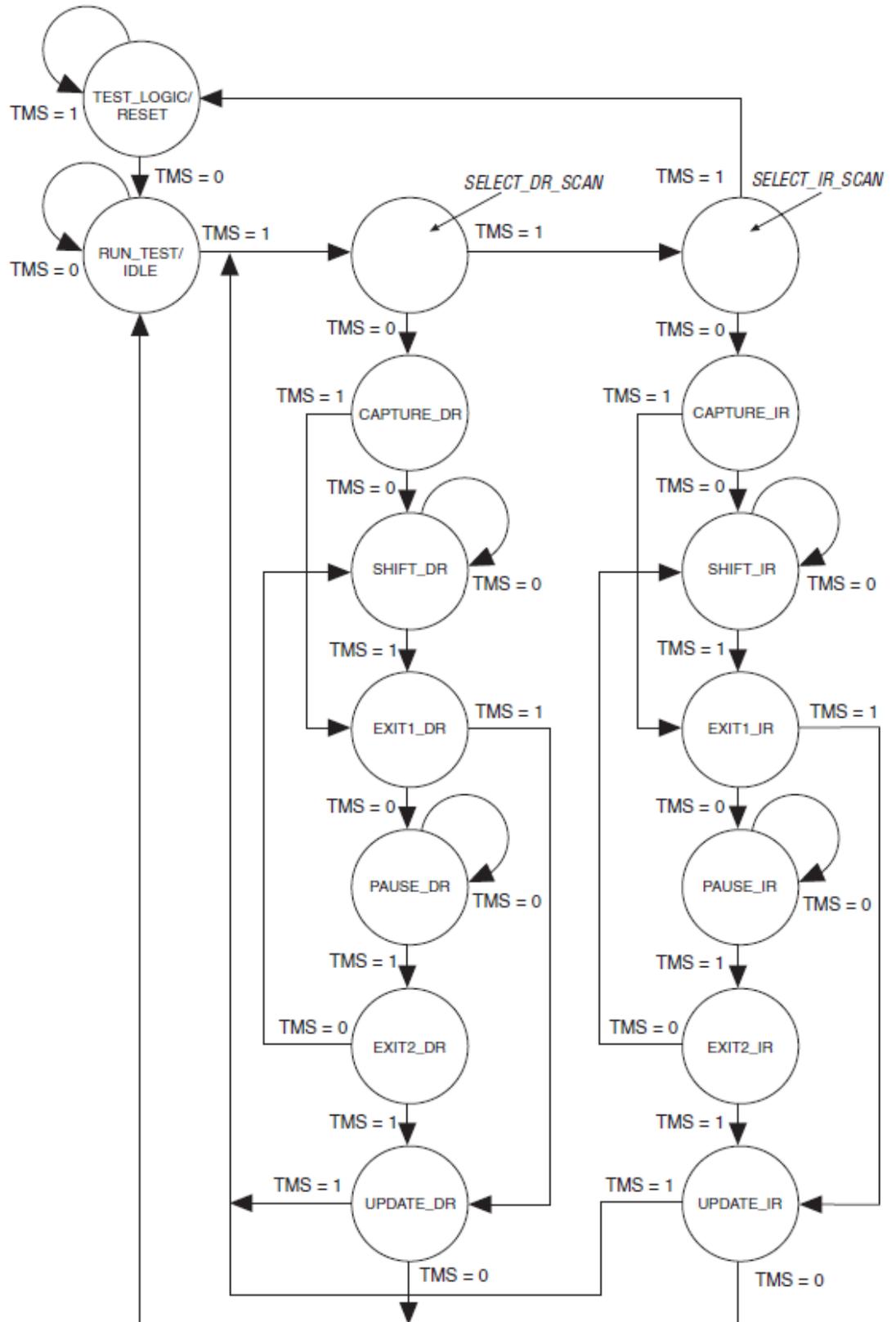


Рисунок 2.7.4 Структурная схема команд TAP контроллера. [12]

Таблица 2.7.2 состояния автомата переключений TAP контроллера.

Test-Logic-Reset	исходное состояние
Run-Test/Idle	переходное состояние контроллера при выполнении тестов или ожидании следующей команды
Select-IR, Select-DR	состояние, после которого будет производиться тестирование команд, данных
Capture-IR, Capture-DR	состояние приёма команд, данных
Shift-IR, Shift-DR	состояние сдвига команд, данных
Exit1-IR, Exit2-IR	выход из режима работы с командами
Exit1-DR, Exit2-DR	выход из режима работы с данными
Pause-IR, Pause-DR	состояние паузы
Update-IR, Update-DR	состояние перезаписи данных в выходные регистры

Во второй части был сделан выбор силовых транзисторов структуры MOSFET, выбрана микросхема драйвера, IR 2101 в качестве микросхемы формирователя импульсов, произведен анализ работы контроллера DSP 56F803 выбранного за хорошие частотные свойства 80МГц, имеющего относительно недорогую цену, доступному для покупки в Европе, Азии, России. Разработана принципиальная электрическая схема силового преобразователя, встраиваемого в BLDC двигатель и имеющую схему подключения аналогичную старой, исследованы структура кадра, идентификатора, рассмотрены основные наборы команд, рассмотрена работа интерфейса JTAG, (применяемого для граничного сканирования и программирования микроконтроллера DSP) Изучен вопрос программирования контроллера DSP в среде CODEWARIOR developer studio, исследованы библиотеки CIA 402 и рассмотрены 2 способа подключения разработанной силовой схемы с управлением по CAN шине от операторской панели ф. WAGO и USB – CAN преобразователя.

3. Математическое моделирование системы электропривода

Для проверки функционирования и настройки параметров системы управления электропривода с вентильным двигателем требуется провести математическое моделирование режимов работы электропривода.

В качестве инструмента моделирования выбираем систему визуального моделирования Simulink пакета MATLAB.

3.1 Математическая модель компонентов системы электропривода

Силовой преобразователь – трехфазный инвертор напряжения, сделанный по мостовой схеме на MOSFET транзисторах из библиотеки SimscapePowerSystems. Трехфазный инвертор получает сигналы управления с блока преобразования выходных сигналов датчиков положения ротора двигателя представленных на рисунке 3.1 в соответствии с таблицей 3.1

Таблица 3.1 Таблица переключений блока преобразования сигналов датчиков положения ротора двигателя

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

На рисунке 3.2 показаны осциллограммы управляющих сигналов Q1- Q6 силовых транзисторов трехфазного инвертора

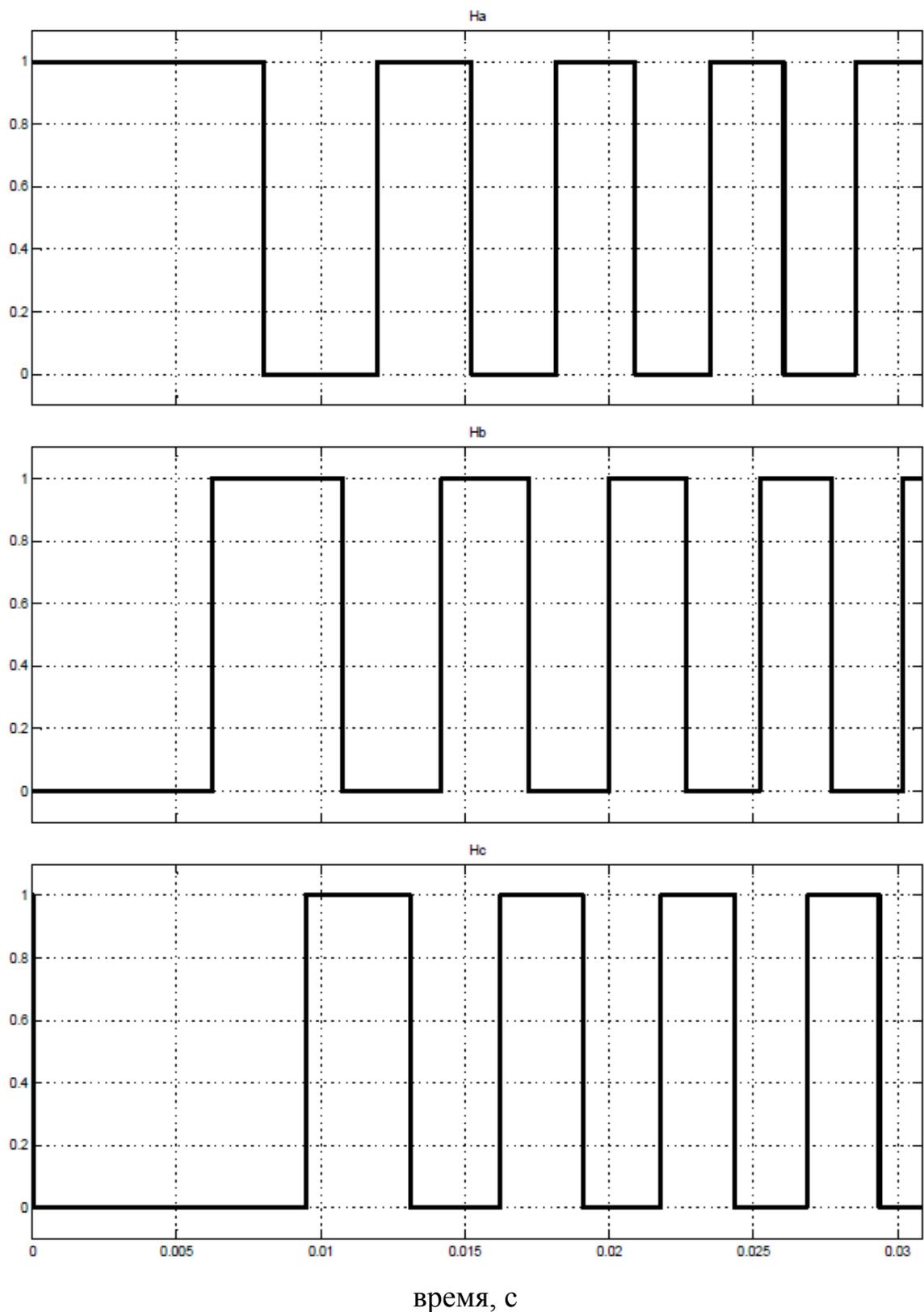


Рисунок 3.1 Осциллограммы выходных сигналов с датчика положения двигателя (каналы А, В, С)

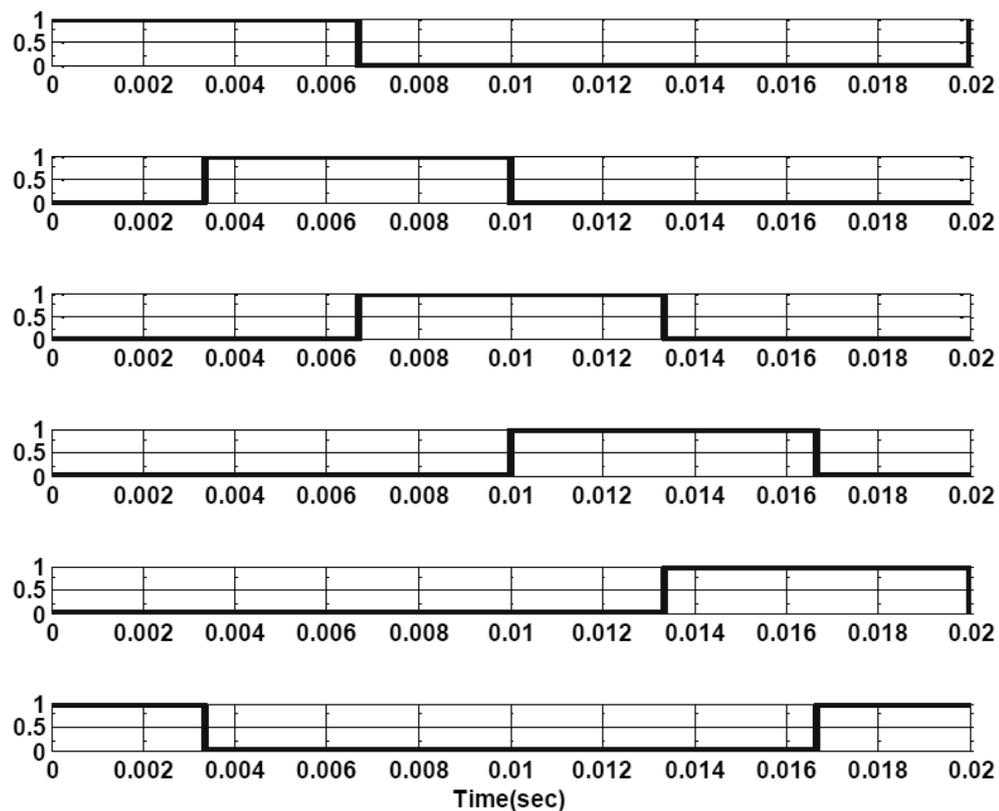


Рисунок 3.2 Осциллограммы управляющих сигналов Q1- Q6 с блока преобразования сигналов датчика положения

Визуальная математическая модель блока преобразования сигналов с датчика положения ротора в соответствии с таблице 1 представлено на (рис. 3.3)

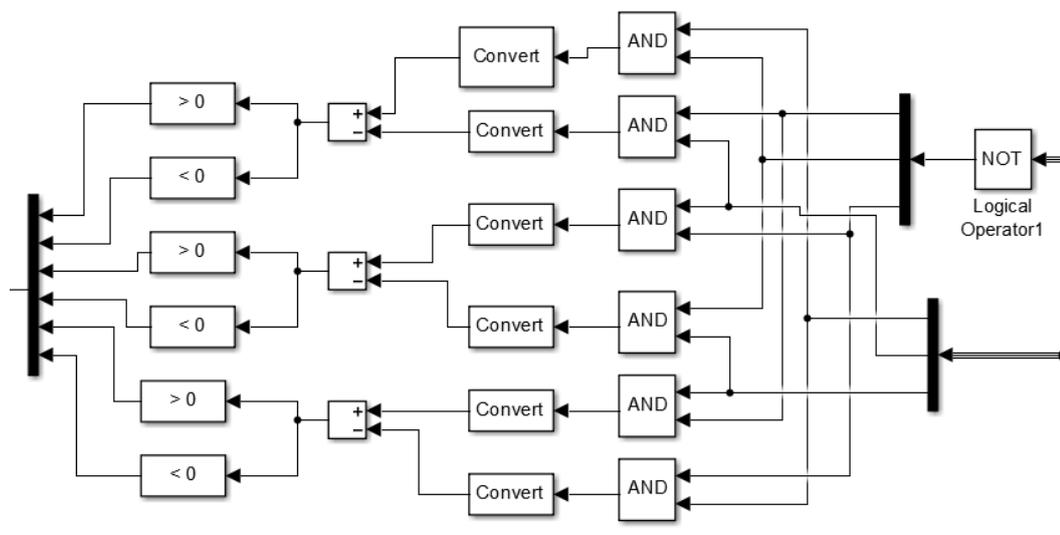


Рисунок 3.3 Визуальная математическая модель блока преобразования

Для моделирования синхронного двигателя используется типовой блок из библиотеки SimscapePowerSystemslibrarySimulink, применяемый для

построении модели синхронного двигателя с постоянными магнитами, в том числе вентильного двигателя с заданием трапециидальной формы магнитодвижущей силы и электрическими и механическими параметрами.

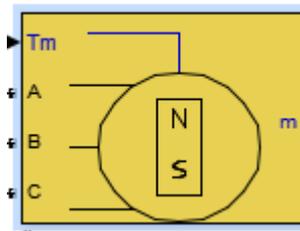


Рисунок 3.4 Блок синхронного двигателя с постоянными магнитами

Configuration	Parameters	Advanced
Stator phase resistance R_s (ohm):		
2.8750		
Stator phase inductance L_s (H)		
8.5e-3		
Machine constant		
Specify: Flux linkage established by magnets (V.s)		
Flux linkage: 0.175		
Voltage constant: 146.6077		
Torque constant: 1.4		
Back EMF flat area (degrees):		
120		
Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m ²) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]:		
[2e-3, 1e-3 4]		
Initial conditions [ω_m (rad/s) θ_{tam} (deg) i_a, i_b (A)]:		
[0,0, 0,0]		

Рисунок 3.5 Окно задания параметров синхронного двигателя

Задание скорости производится с регулятора скорости путем подачи сигнала управления на блок задания напряжения промежуточного контура с наложением ограничения по максимальному и минимальному значению.

В качестве регулятора скорости выбран пропорционально-интегральный регулятор, позволяющий устранить статическую ошибку рассогласования и получить более качественные динамические показатели по сравнению с пропорциональным регулятором.

Для регулирования по частоте вращения задание скорости производится с блока задатчика напрямую.

При реализации регулирования по положению задание частоты вращения формируется регулятором положения с ограничением максимальной и минимальной частоты вращения ротора двигателя.

В качестве регулятора положения используется пропорциональный регулятор.

3.2 Моделирование режимов работы системы электропривода с управлением по скорости

Визуальная математическая модель, построенная в программной среде Simulink на основе структурной и функциональной схемы представлена на рисунке .

В качестве тестового сигнала задания используется ступенчатое управляющее воздействие задания частоты вращения - 1000 об/мин.

Задание внешнего момента нагрузки производится путем наброса нагрузки с режима холостого хода 0 Нм до заданного значения 3Нм с целью проверить реакцию системы управления на воздействие внешних воздействий.

На разработанной визуальной математической модели были смоделированы следующие тестовые режимы работы:

- Пуск двигателя без нагрузки до заданной скорости 1000 об/мин
- Ступенчатый наброс механической нагрузки с моментом 3 Нм на 0.2 с времени.

Был произведен выбор оптимальных параметров пропорционально-интегрального регулятора скорости: коэффициент усиления и постоянная времени, с целью снижения времени переходного процесса и уменьшения величины перерегулирования фактической частоты вращения

Осциллограммы снятых сигналов показаны на рисунках ____

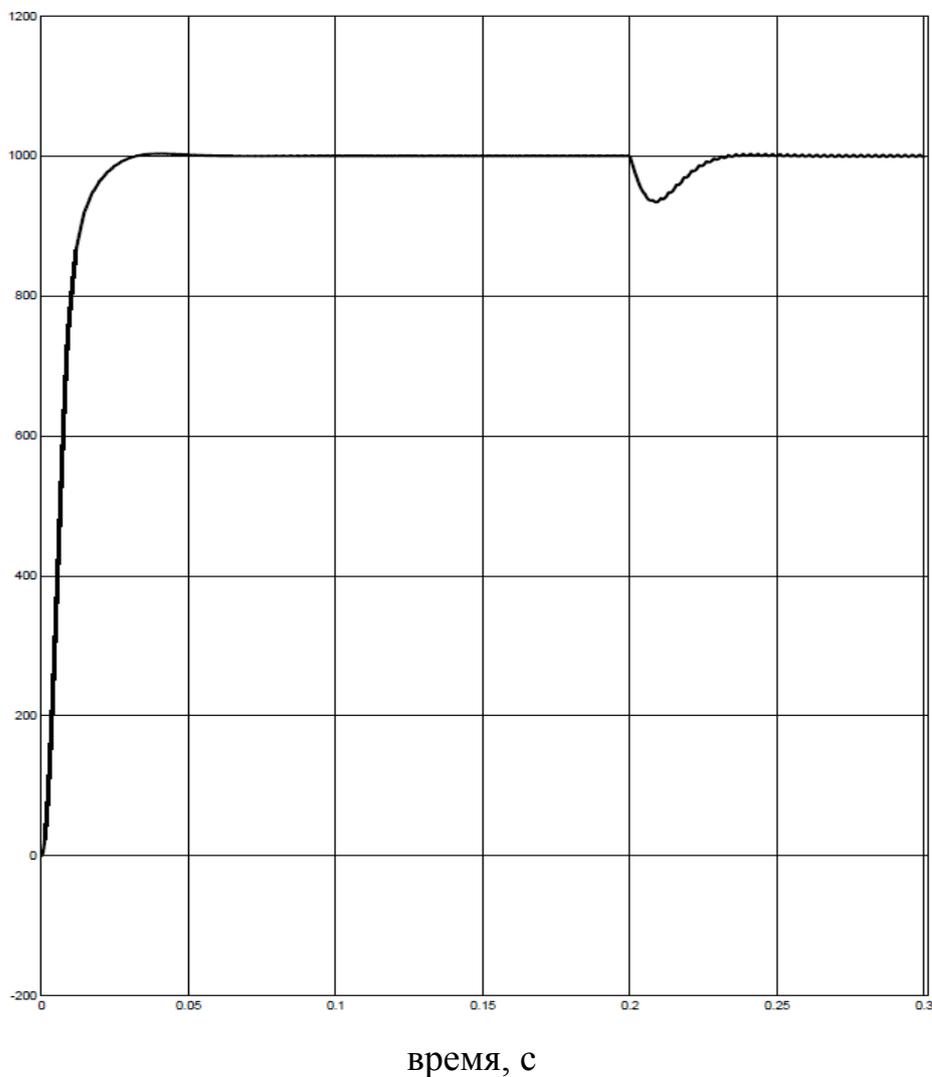


Рисунок 3.7 Частота вращения двигателя, об/мин

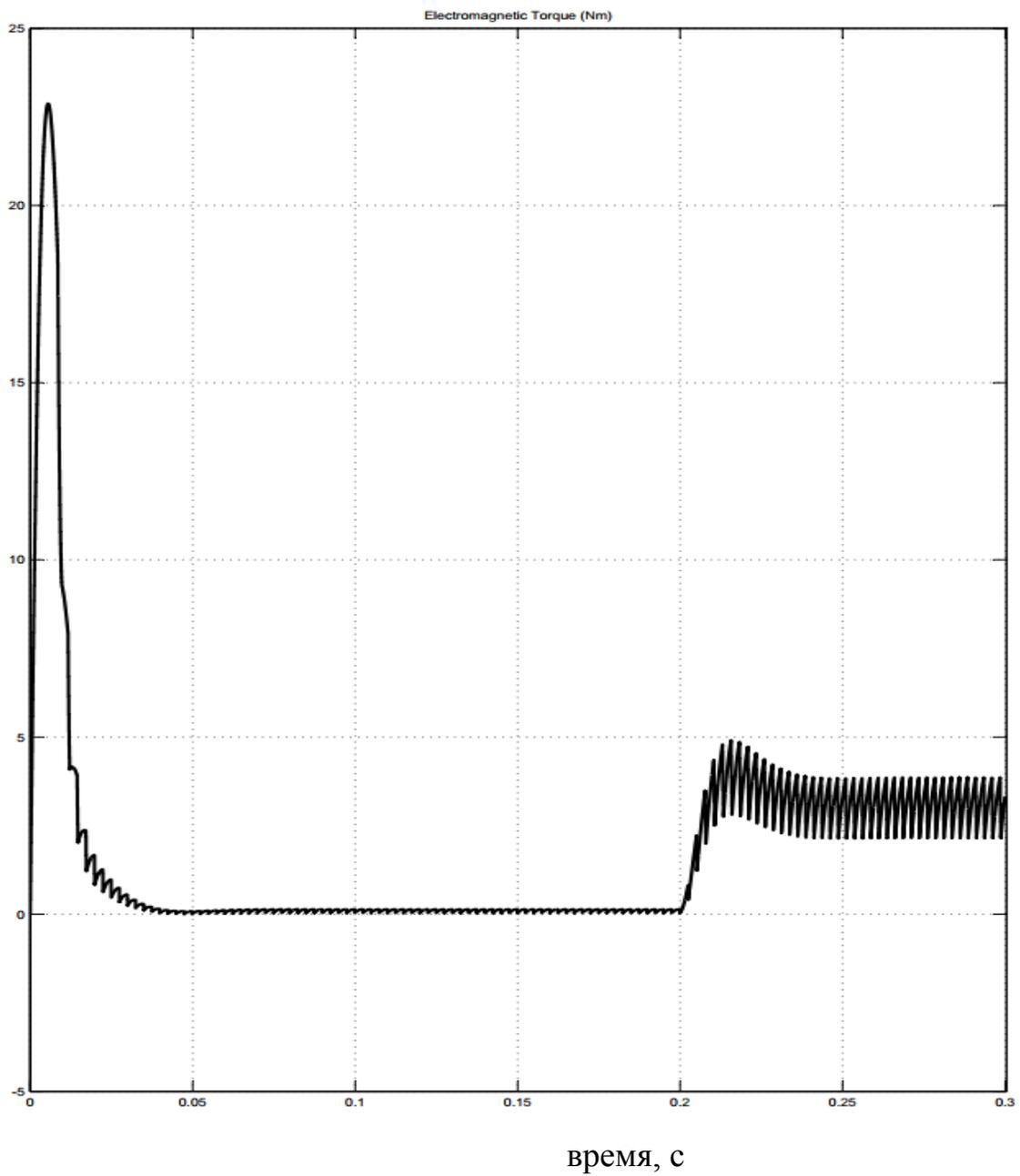


Рисунок 3.8 Электромагнитный момент двигателя, Нм

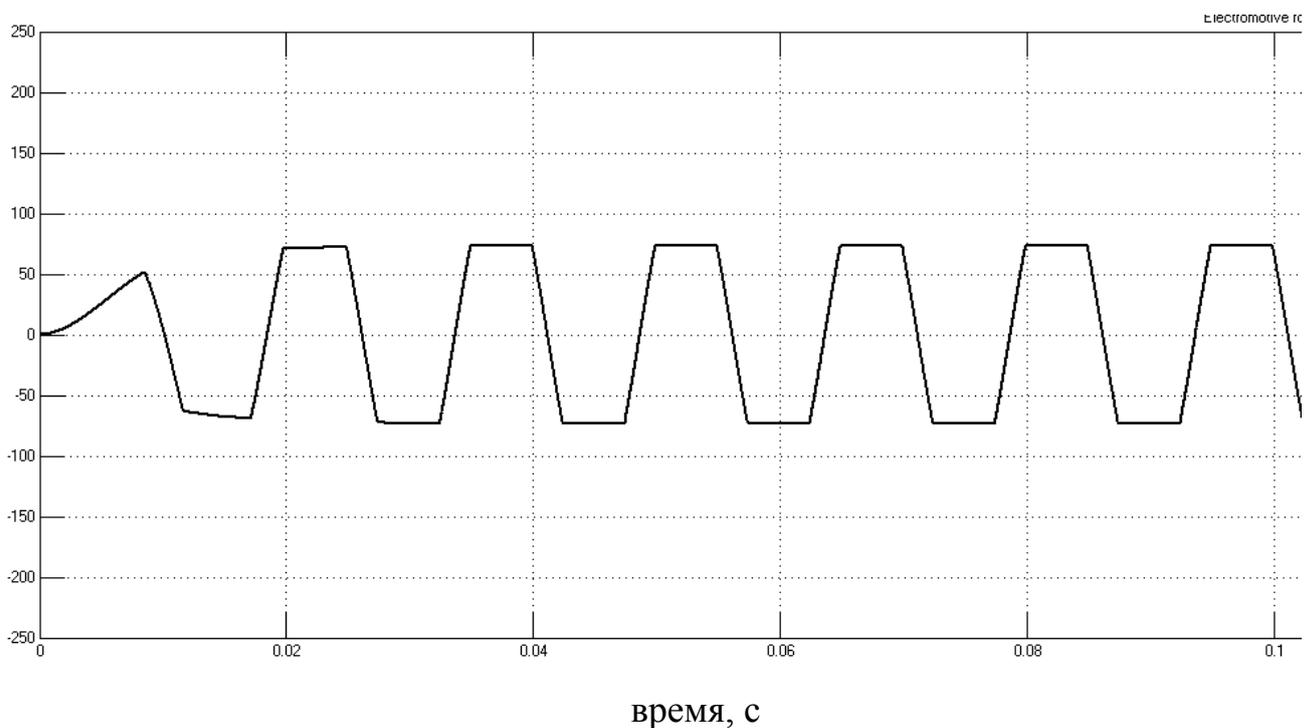


Рисунок 3.9 Фазный ток статора двигателя при пуске, об/мин

3.3 Моделирование режимов работы системы электропривода с управлением по положению

Визуальная математическая модель системы позиционного электропривода с контуром регулирования положения, построенная в программной среде Simulink на основе структурной и функциональной схемы представлена на рисунке.

В качестве тестового сигнала задания используется ступенчатое управляющее воздействие задания углового перемещения – 2 полных оборота двигателя или 720 град.

Задание внешнего момента нагрузки производится путем наброса нагрузки с режима холостого хода 0 Нм до заданного значения 3 Нм с целью проверить реакцию системы управления на воздействие внешних воздействий.

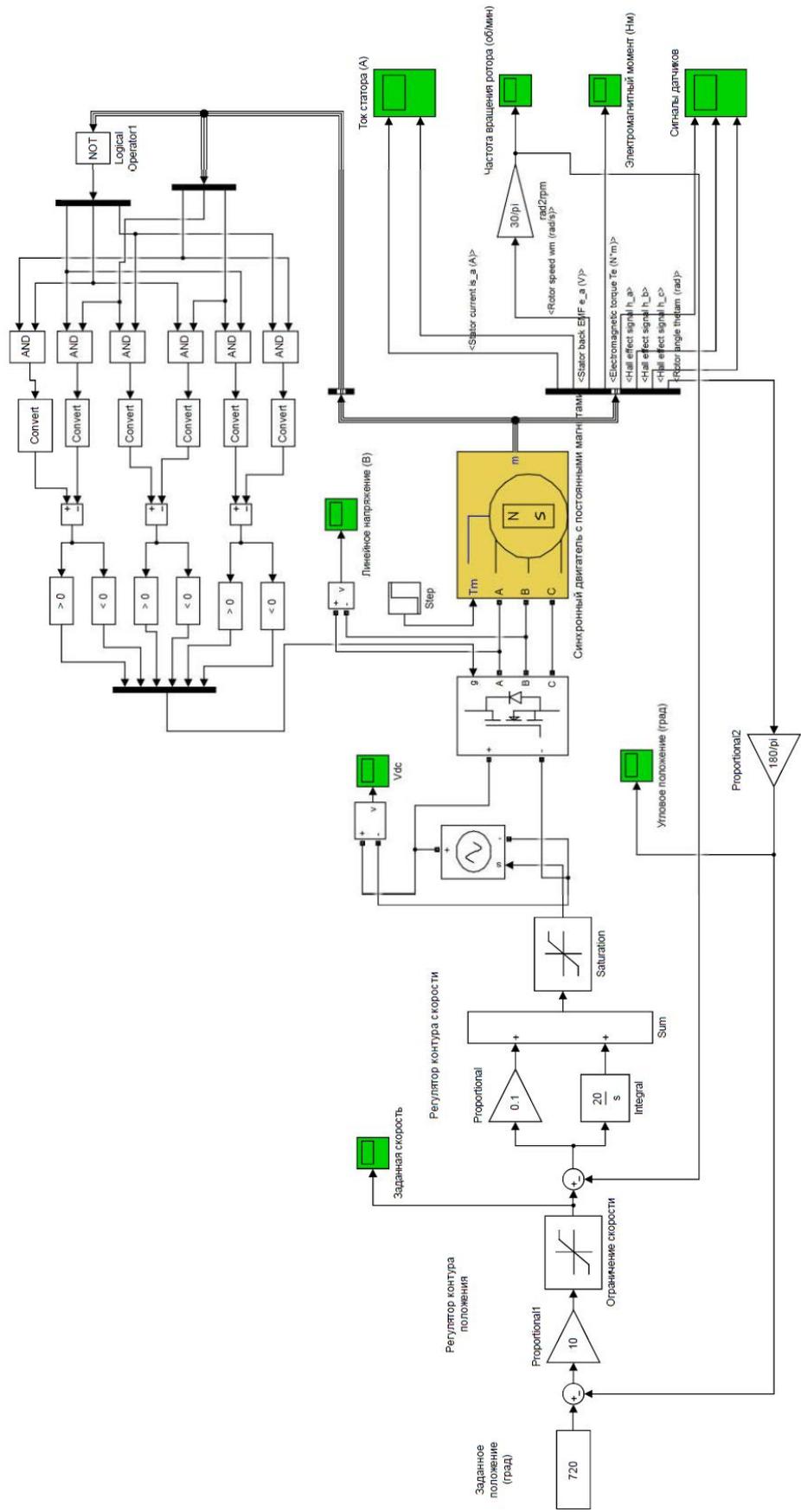


Рисунок 3.10 Математическая модель системы электропривода с регулированием по угловому положению

На разработанной визуальной математической модели были смоделированы следующие тестовые режимы работы:

- Угловое перемещение вала двигателя без нагрузки до заданного положения 720град
- Ступенчатый наброс механической нагрузки с моментом 3 Нм на 0.2 с времени.

Был произведен выбор оптимального коэффициента усиления пропорционально регулятора положения с целью снижения времени переходного процесса (быстродействие) и уменьшения величины перехода за заданное положение

Осциллограммы снятых сигналов показаны на (Рис. 3.11, 3.12, 3.13, 3.14).

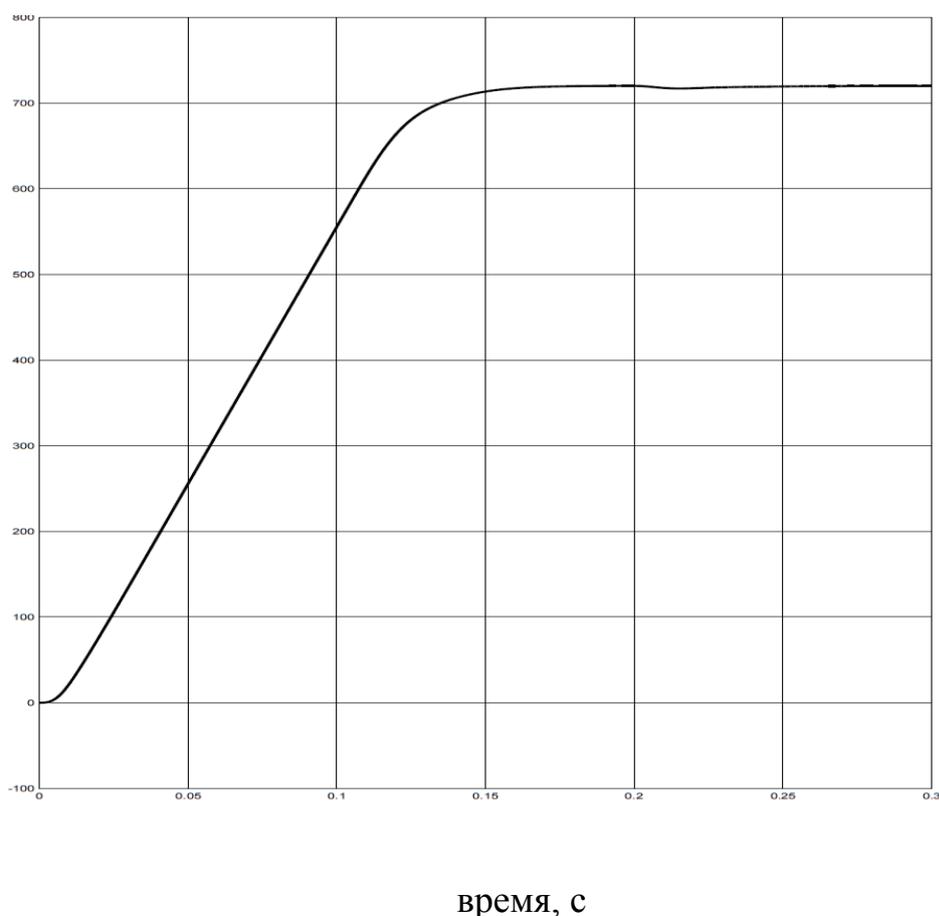
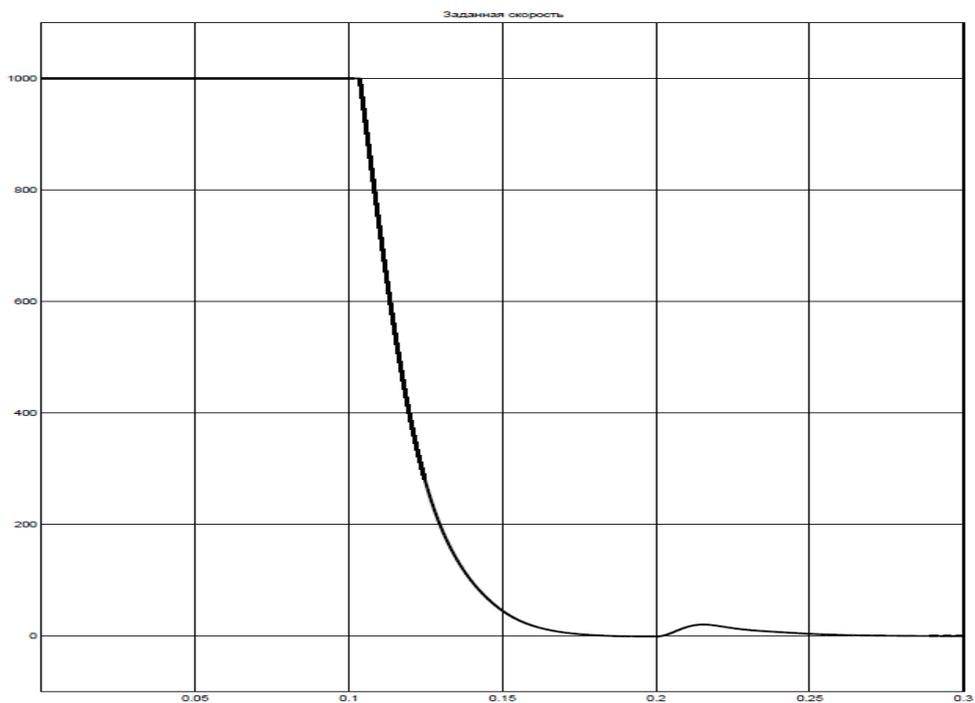


Рисунок 3.11 Угловое положение вала двигателя, град



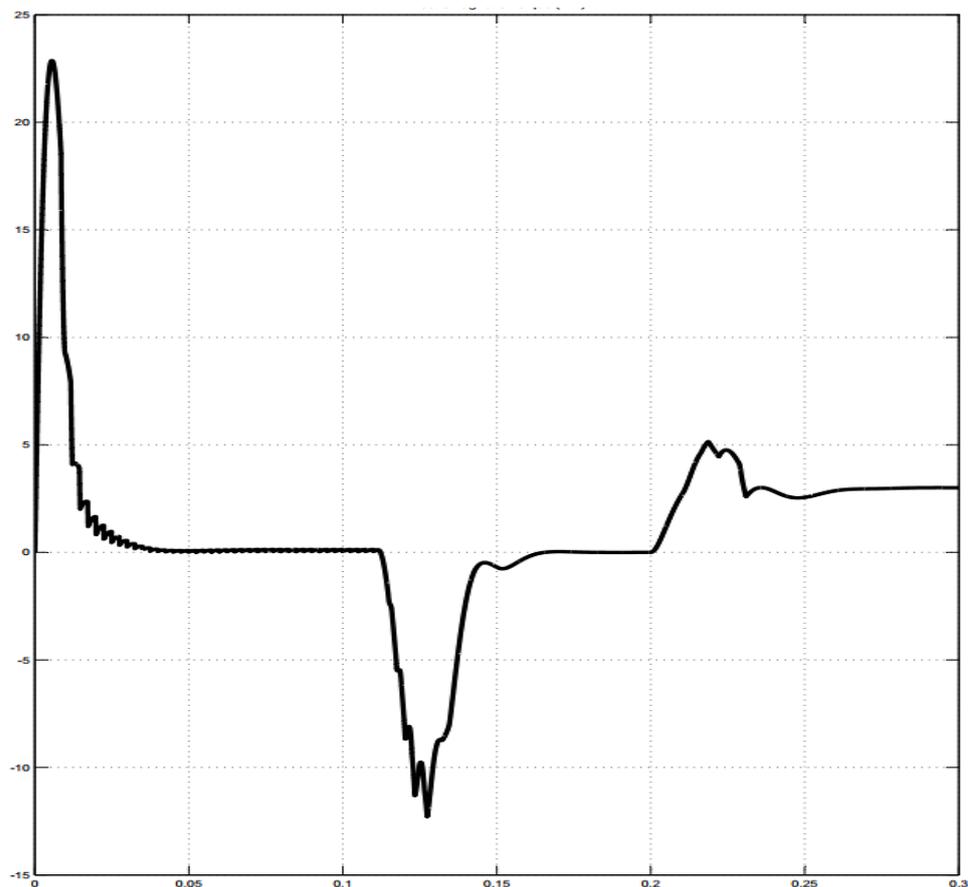
время, с

Рисунок 3.12 Частота вращения двигателя, об/мин



время, с

Рисунок 3.13 Угловое положение вала двигателя, град



время, с

Рисунок 3.14 Угловое положение вала двигателя, град

В третьей части диссертации при помощи инструмента MATLAB Simulink было произведено математическое моделирование системы электропривода для проверки функционирования и настройки параметров системы управления, электропривода с вентильным двигателем и обратной связью в виде инкрементного магнитного датчика, построены осциллограммы выходных сигналов с датчика положения двигателя по каналам А, В,С, осциллограммы управляющих сигналов Q1-Q6, построены визуальные математические модели системы электропривода с регулированием по частоте, по угловому положению, были смоделированы тестовые режимы работы пуск двигателя до скорости 1000 об/мин, ступенчатый наброс нагрузки угловое перемещение вала без нагрузки до заданного положения в 720 градусов, ступенчатый наброс механической нагрузки с моментом 3Нм на 0.2 с.

Заключение

В первой части было проведено исследование принципа работы бесколлекторного двигателя постоянного тока (Brushless DC-Motor) или вентильного двигателя, построены функциональная и кинематическая схемы, исследованы режимы работы инкрементального магнитного датчика, схемы подключения разрабатываемого силового блока, основные электромеханические характеристики сведены в таблицу 1.1.

Во второй части был сделан выбор силовых транзисторов структуры MOSFET, выбрана микросхема драйвера, IR 2101 в качестве микросхемы формирователя импульсов, произведен анализ работы контроллера DSP 56F803 выбранного за хорошие частотные свойства 80 МГц, имеющего относительно недорогую цену, доступному для покупки в Европе, Азии, России. Разработана принципиальная электрическая схема силового преобразователя (приложение 3), встраиваемого в BLDC двигатель и имеющую схему подключения аналогичную старой, исследованы структура кадра, идентификатора, рассмотрены основные наборы команд, рассмотрена работа интерфейса JTAG, (применяемого для граничного сканирования и программирования микроконтроллера DSP) Изучен вопрос программирования контроллера DSP в среде CODEWARIOR developer studio, исследованы библиотеки CIA 402 и рассмотрены 2 способа подключения разработанной силовой схемы с управлением по CAN шине от операторской панели ф. WAGO (приложение 4) и USB – CAN преобразователя. Данные исследования и разработки имеют не только теоретическую значимость, но и практическую значимость т.к. базируясь на результатах исследований в области CAN протокола создана методика управления приводами по CAN шине с помощью доступных средств с целью контроля параметров и ввода в эксплуатацию.

В третьей части диссертации при помощи инструмента MATLAB Simulink было произведено математическое моделирование системы электропривода для проверки функционирования и настройки параметров

системы управления, электропривода с вентильным двигателем и обратной связью в виде инкрементного магнитного датчика, построены осциллограммы выходных сигналов с датчика положения двигателя по каналам А, В,С, осциллограммы управляющих сигналов Q1-Q6, построены визуальные математические модели системы электропривода с регулированием по частоте, по угловому положению, были смоделированы тестовые режимы работы пуск двигателя до скорости 1000 об/мин, ступенчатый наброс нагрузки угловое перемещение вала без нагрузки до заданного положения в 720 градусов, ступенчатый наброс механической нагрузки с моментом 3Нм на 0.2 с.

Список используемых источников

1. [электронный ресурс]:
https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_TECHNICAL_INFORMATION.pdf
2. [электронный ресурс]:
https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_3564_B_CX_DFF.pdf
3. [электронный ресурс]:
<https://www.faulhaber.com/en/products/series/3564b-cx/>
4. Денисов В.А., Третьякова М.Н. Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии.- Тольятти : изд-во ТГУ- 2014. 108с.
5. [электронный ресурс]:
<https://www.infineon.com/dgdl/ir2101.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c>
6. [электронный ресурс]:
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/DSP56F803.pdf>
7. [электронный ресурс]:
https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_7000_05030.pdf
8. [электронный ресурс]: <https://www.mictronics.de/projects/usb-canvas/>
9. [электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200126802>
10. Статья JTAG-тестирование Иосиф Карштенбойм Журнал современная электроника №2 2007г.
11. [электронный ресурс]:
<https://habr.com/post/190012/>
12. [электронный ресурс]:

https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/130050-ac160-ieee-standard-1149-1-jtag-in-the-sx-rt54sx-s-families-app-note13. Копылов, И.П., Математическое моделирование электрических машин / Копылов.И.П. М.: Высшая школа, 2014. - 327 с.

14. Копылов, И.П. Электрические машины: учеб. для Высших учебных заведений / И.П. Копылов. М.: Высшая школа, 2013. - 617 с.

15. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink / И.В. Черных. СПб.: Питер, 2012. - 318 с.

16. Пионтковская, С.А. Подготовка магистерской диссертации: учеб.-метод. пособие / С.А. Пионтковская. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – 83 с.

17. Герман-Галкин, С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2012. – 368 с.

18. Гольдберг, О.Д. Инженерное проектирование электрических машин. Учебник для вузов (для бакалавров и магистров) / О.Д. Гольдберг, Л. Н. Макаров, С. П. Хелемская. – М.: ООО ИД БАСТЕТ, 2016. – 528 с.

19. Шпак, Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. Учебник. – МЭИ 2015.

20. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов. Учебник. – МЭИ 2015.

21. Редькин, П.П. Микроконтроллеры ARM7. Семейство LPC2000. Руководство пользователя. Программные решения. // Москва, издательский дом «Додэка-XXI». – 2013.

22. Терехов, В. М. Система управления электроприводов / В. М. Терехов, О. И. Осипов – М. : ИЦ «Академия», 2006. – 304 с.

23. Carraro M. and M.Zigliotto. 2014 Automatic Parameter Identification of inverter-Fed induction motors of Standstill. Industrial Electronics. IEEE Transactions on 61(9): 4605-4613.

24. Fan B., Z. Yang, W. Wei Xu and X. Wang. 2014 Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering* 2014.
25. Rohan Chadha, JaiPrakash Permanent Magnet DC Motor Control Using Image Processing *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering (IJARCSEE)* Volume 1, Issue 8, October 2012
26. Kiran George, Shinoy K S2, Sija Gopinath Finite Element Modeling of Five Phase Permanent Magnet BLDC Motor for High Power Density Application *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* Vol. 3, No. 4 December 2013, pp. 384~390
27. M. K. Metwally Control of Four Switch Three Phase Inverter Fed Induction Motor Drives Based Speed and Stator Resistance Estimation *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* Vol. 4, No. 2, June 2014, pp. 192~203
28. Long Chen, Xiaodong Sun, Haobin Jiang, and Xing Xu A High-Performance Control Method of Constant V/f -Controlled Induction Motor Drives for Electric Vehicles Hindawi Publishing Corporation *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2014, Article ID 386174, 10 pages
29. [электронный ресурс]: <http://www.test-d.cncinfo.ru/index.php?id=211>
30. Troubleshooting and Repairing Personal Computers 3rd Edition Art Margolis 2015 by Windows Books, an imprint of TAB Books.
31. Козярук А.Е., Жуковский Ю.Л. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию. Москва: Горное оборудование и электромеханика, 2014, № 10, с. 8-14.

Приложение 1

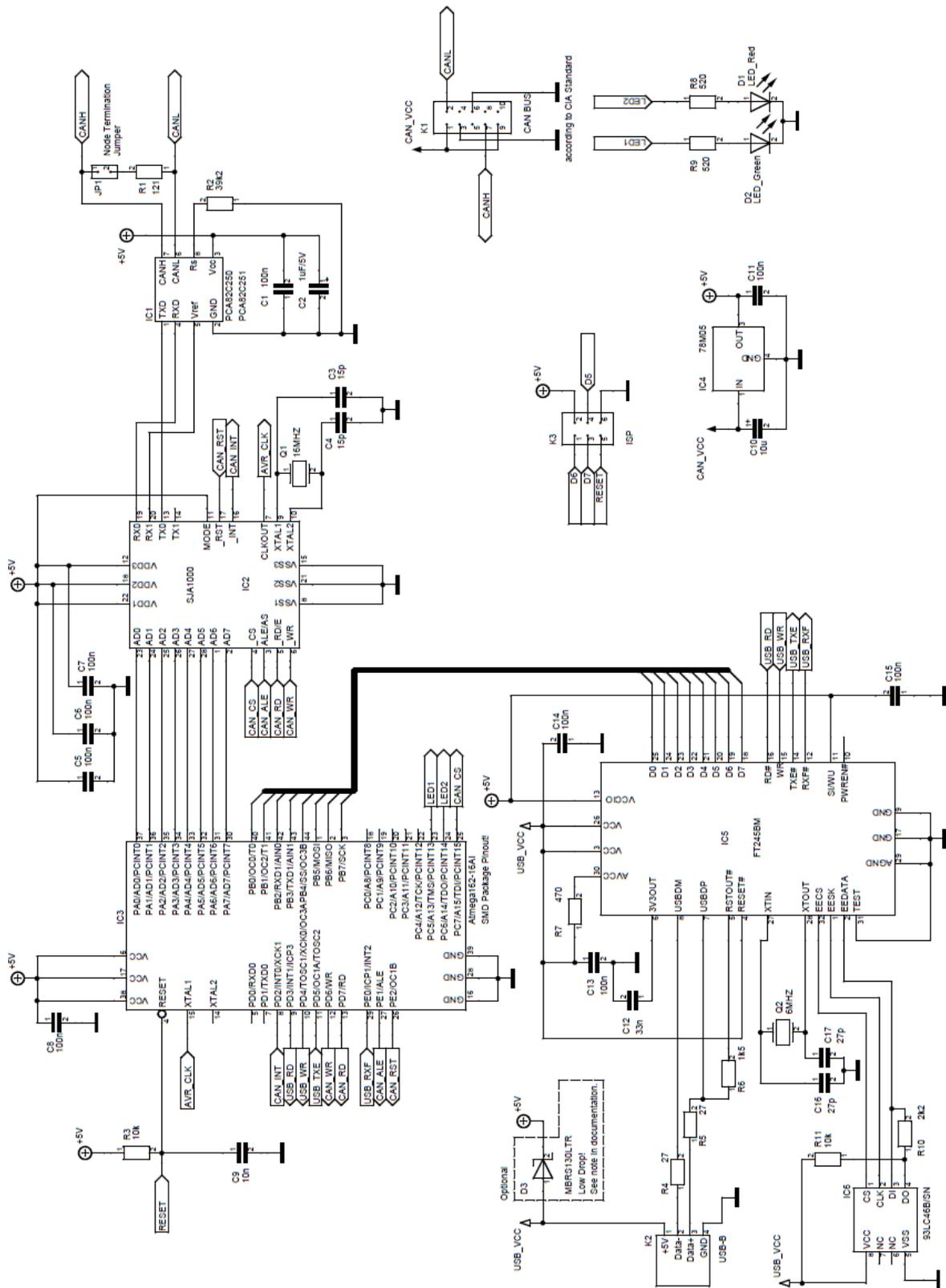
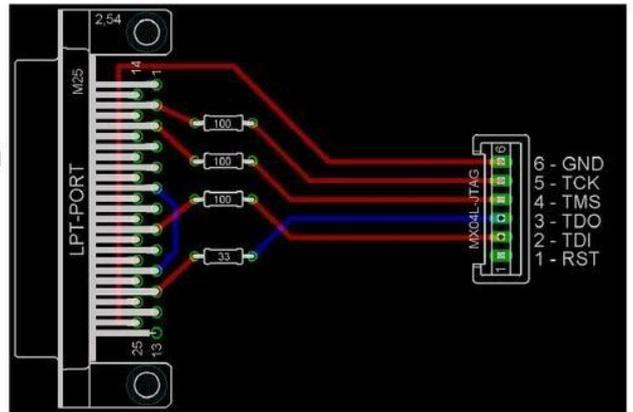
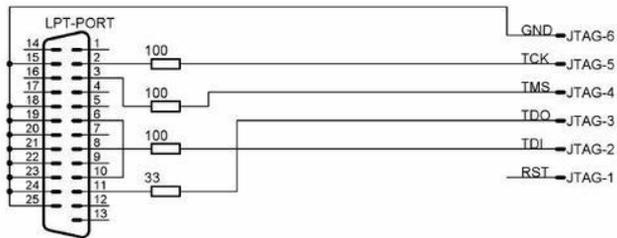
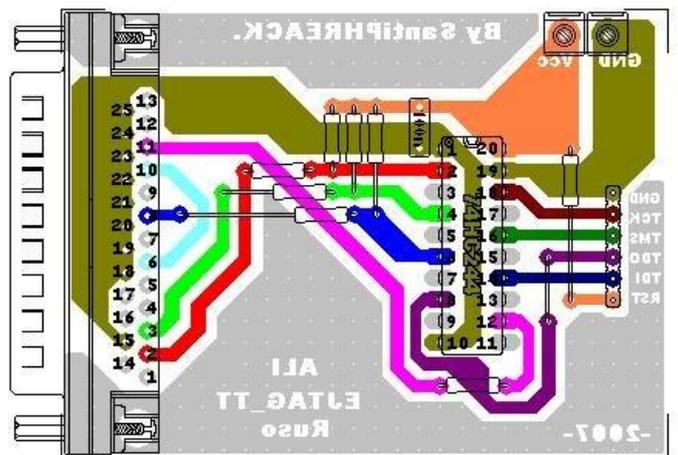
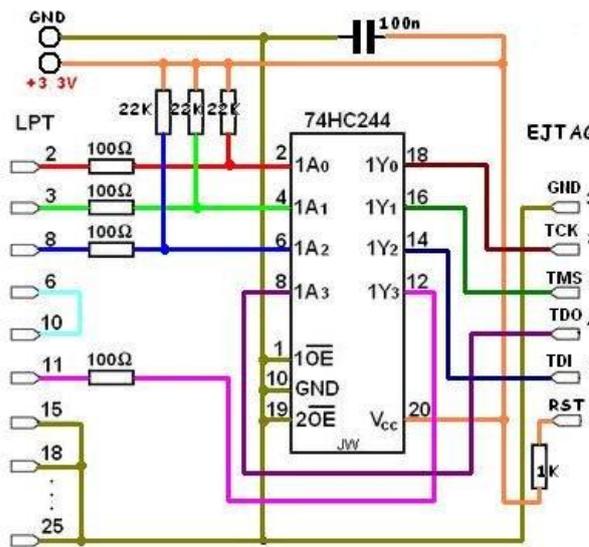


Схема USB-CAN преобразователя [8]

Приложение 2



a)

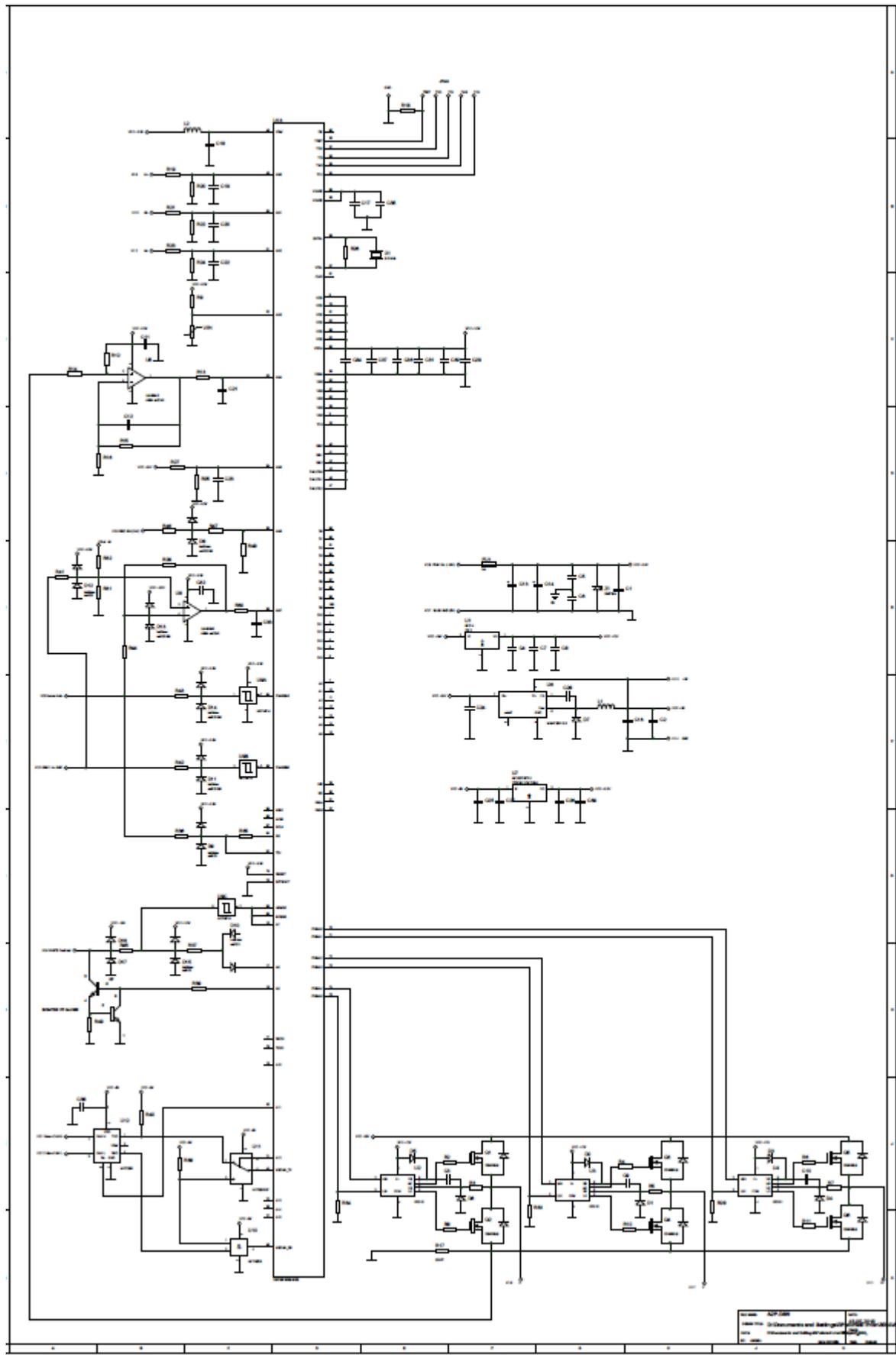


б)

Схемы программаторов JTAG

а) на резисторах б) с формирователем импульсов на буферном регистре

Приложение 3



Приложение 4

Рассмотрим пример подключения привода Copley Controls и панели оператора WAGO perspecto 762-3035 по протоколу CAN-OPEN с использованием библиотеки CIA402

В программе настройки привода Copley Controls, выбираем вкладку CAN Configuration и указываем под каким ID номером будет привод, определяем скорость передачи данных.

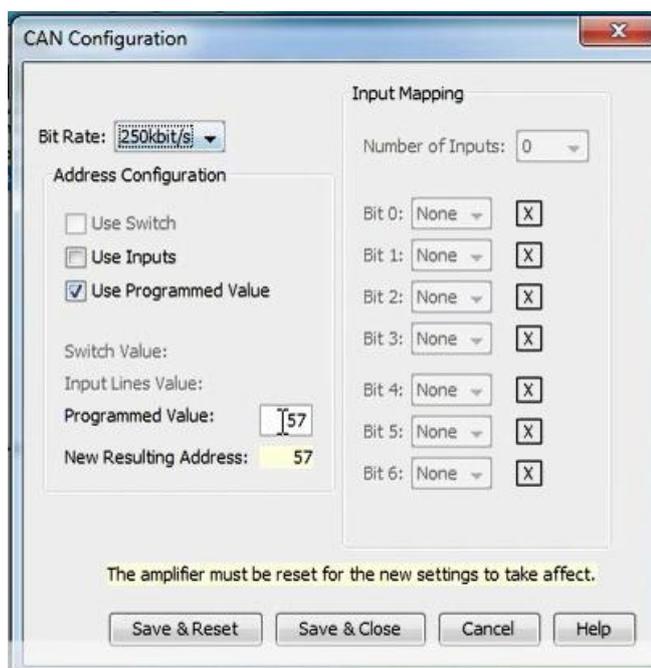


Рисунок 4.1 присваиваем NODE номер приводе (57) и выбираем скорость передачи данных (250Кбит/с)

Открываем программу CODESYS, выбираем для какого устройства будет сделан проект, в комплекте с операторской панелью WAGO perspecto 762-3035 идут конфигурационные целевые TARGET файлы, которые инсталлируются в среду разработки программу CODESYS и при создании нового проекта выбираем, что проект будет создан для WAGO perspecto 762-3035. Дальше выбираем язык на котором будет выполнен проект, его оставляем без изменения LD. На рисунке 4.2 изображено меню выбора языка программирования.

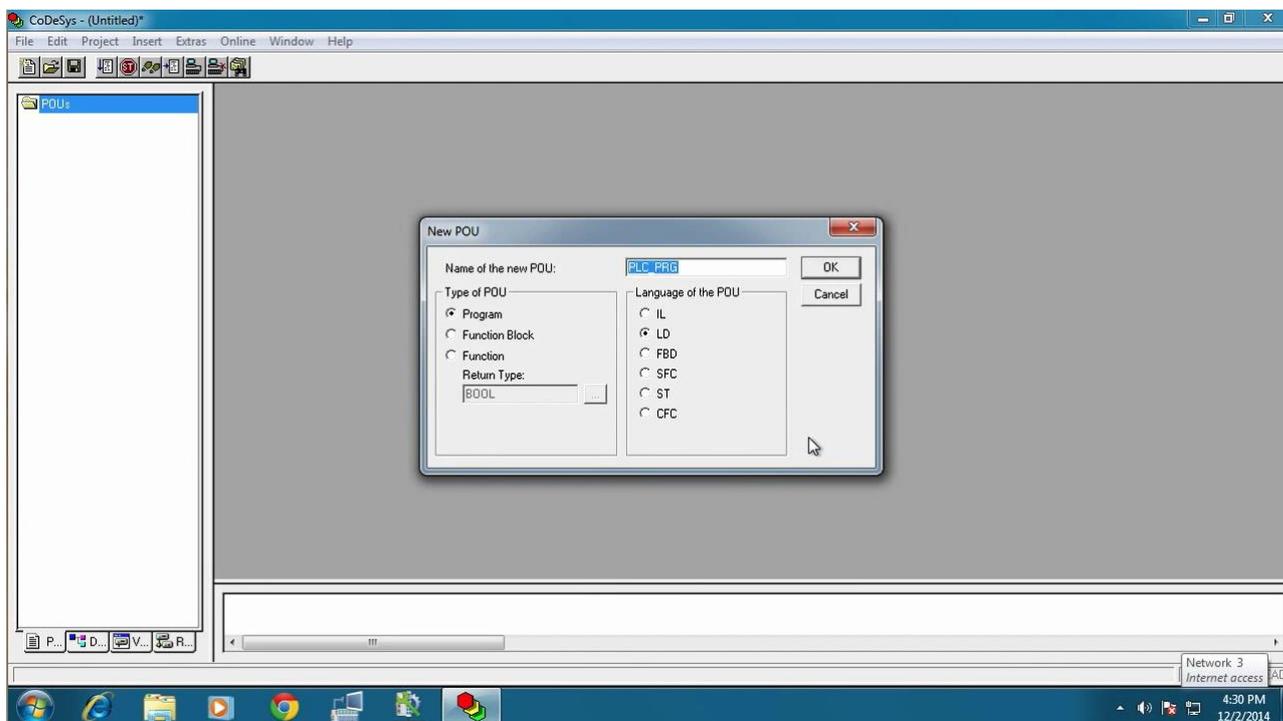


Рисунок 4.2 выбор языка программирования

Далее выбираем внизу вкладку Resources и в ней PLC Configuration далее необходимо в верхнем меню выбрать вкладку Extras, дальше Add Configuration file и показать путь к .eds файлу конфигурации привода Copley Controls, скаченному с сайта производителя. Затем выбираем PLC Configuration , Append Subelement см. Рис. 4.3 и в нем выбираем CAN Device. Появится меню изображенное на рисунке 4.4. В нем нужно указать ID привода ранее выбранного и сконфигурированного (57) и как часто производить Guarding, это процедура, при которой происходит опрос привода с целью получить сообщение обратной связи о его состоянии. Устанавливаем параметр времени опроса 500 миллисекунд. Далее необходимо прописать библиотеку CIA 402, которая идет в комплекте с операторской панелью WAGO. Для установки библиотеки необходимо выбрать вкладку в левом меню Library Manager и в появившемся поле нажав правую кнопку мыши выбрать Add Library. Откроется окно, в котором будет предложено указать путь к файлу добавляемой библиотеки.

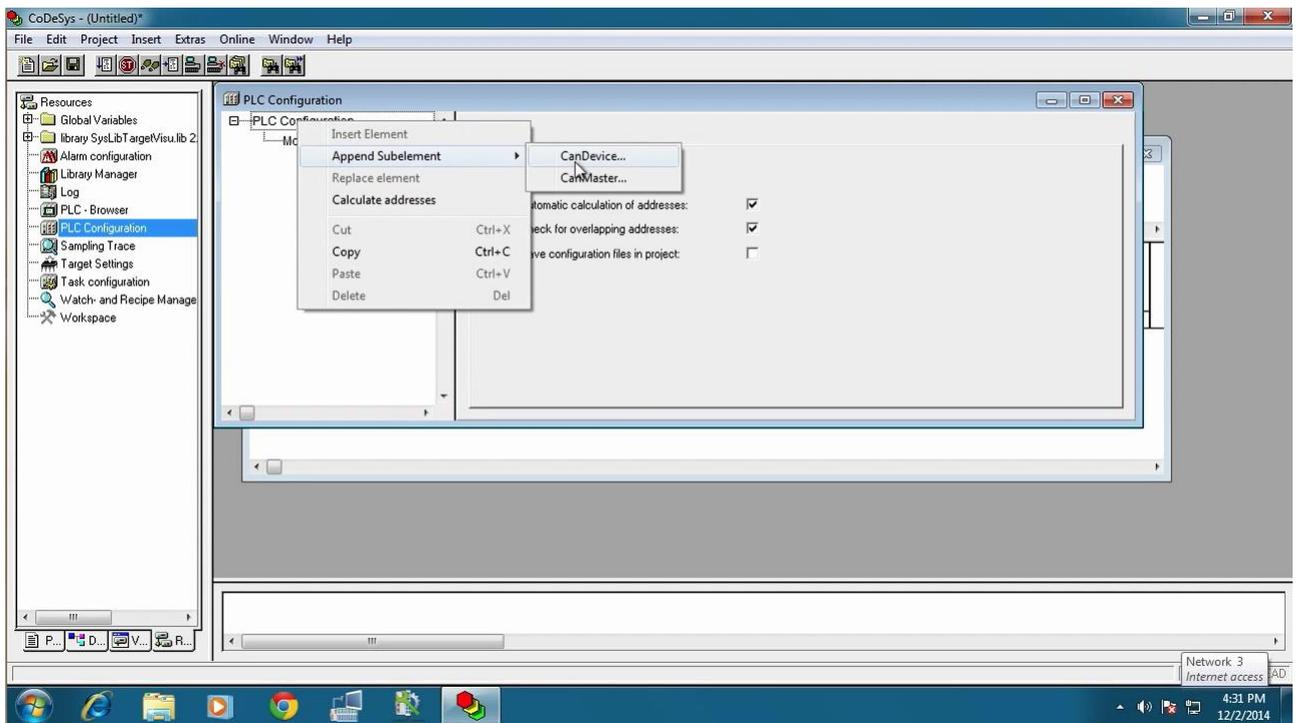


Рисунок 4.3 выбор устройства исполнителя.

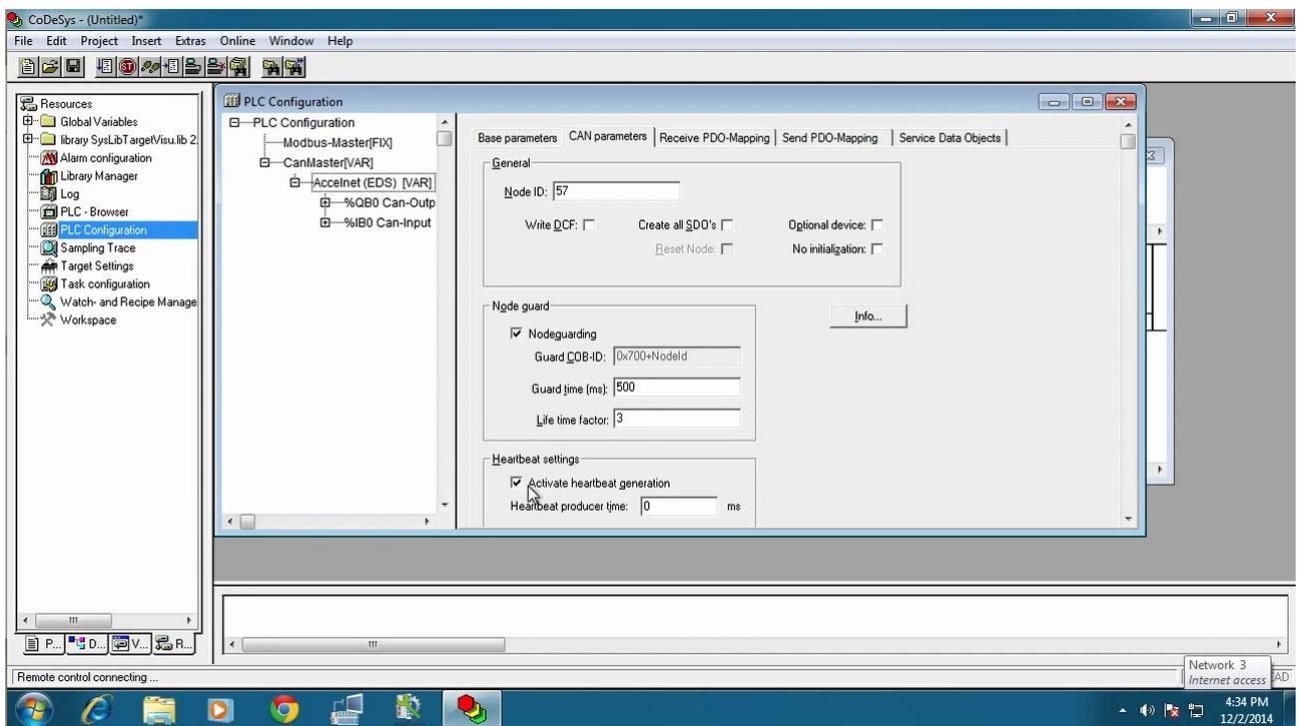


Рисунок 4.4 меню настройки устройства исполнителя, соединенного по CAN шине.

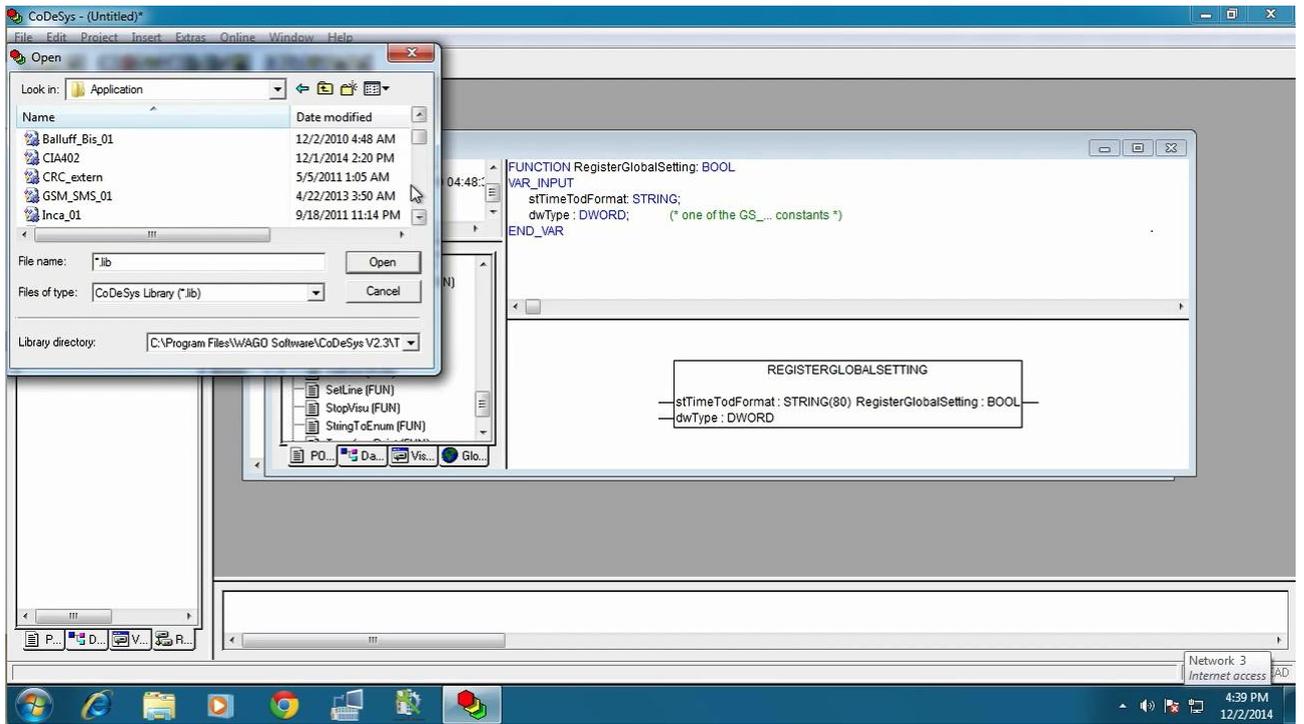


Рисунок 4.5 Установка библиотеки CIA402 в проект.

После добавления библиотеки появится элемент управления Drive1, изображенный на рисунке 4.6

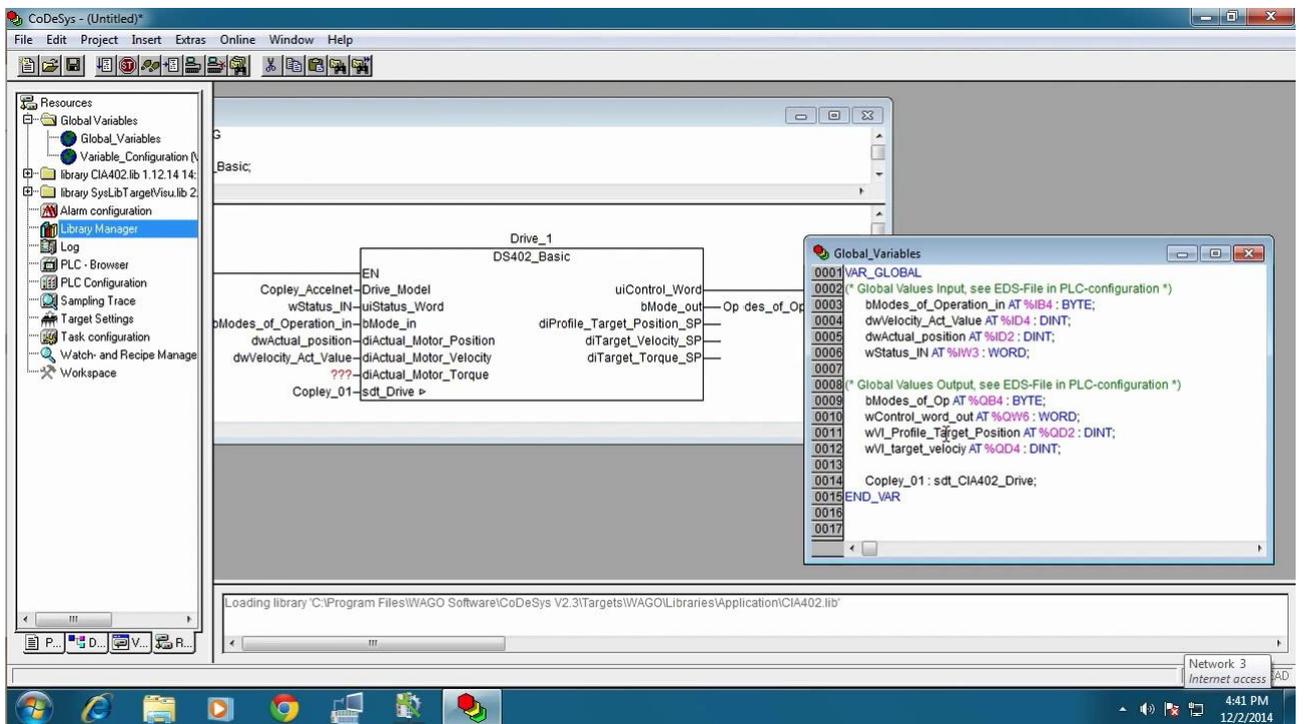


Рисунок 4.6 элемент управления приводом и окно вводимых переменных

После появления элемента управления необходимо произвести выбор переменных и тем самым прописать конфигурацию этого элемента, выбрать входа и выхода. Рассмотрев, внимательнее видим, что на входах и выходах у этого элемента Drive1 находятся сигналы (таблицы 4.1, 4.2)

Таблица 4.1 входные сигналы

EN	Вход разрешения enable
Drive model	Модель привода
uiStatus_Word	Слово статуса привода
bMode_in	Слово переключения режима (000H)
diActual_Motor_Position	OP Mode 0 (режим управления по позиционированию)
diActual_Motor_Velocity	OP Mode 1 (режим управления по скорости)
diActual_Motor_Torque	В проекте остался неиспользованным
Sdt_Drive	

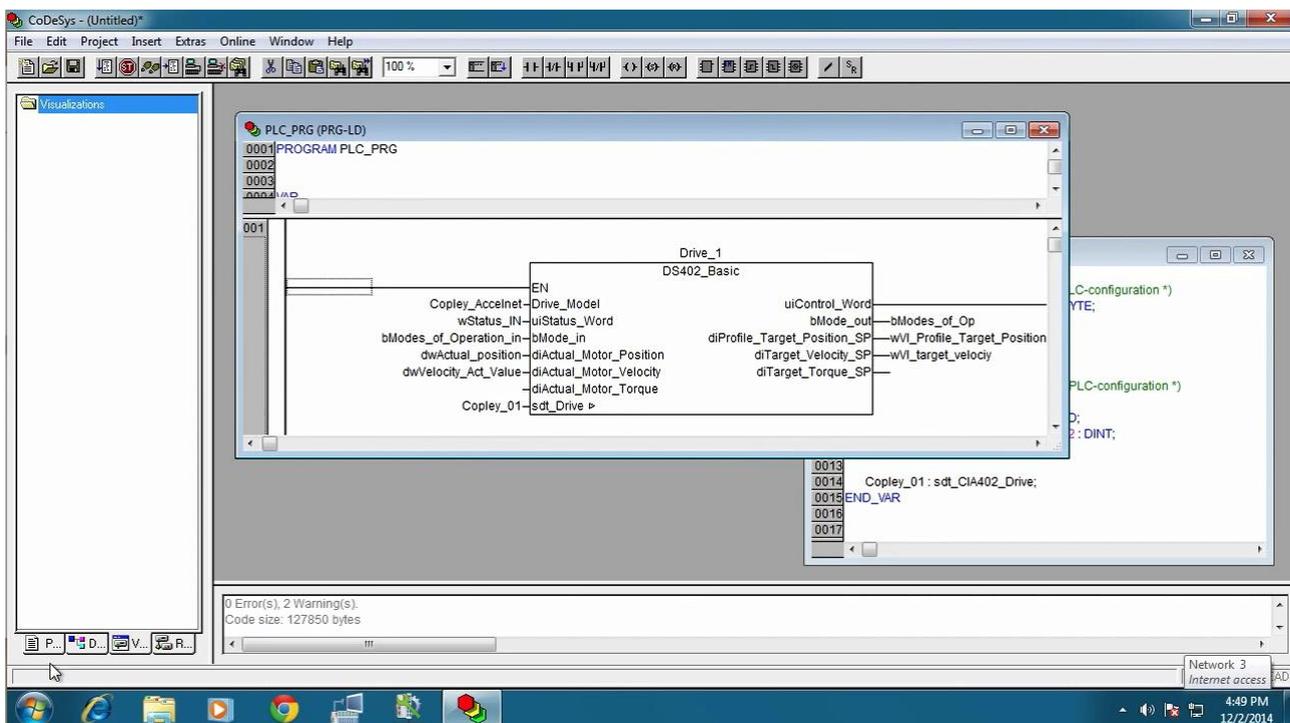


Рисунок 4.7 полностью сконфигурированный элемент управления Drive1

Таблица 4.2 выходные сигналы

uiControl_word	Контрольное слово
bModeout	Состояние режима работы
diProfile_Target_Position_SP	Подтверждение заданной позиции
diProfile_Target_Velocity_SP	Подтверждение заданной скорости
diProfile_Target_Torque_SP	Не использовано подтверждение заданного момента

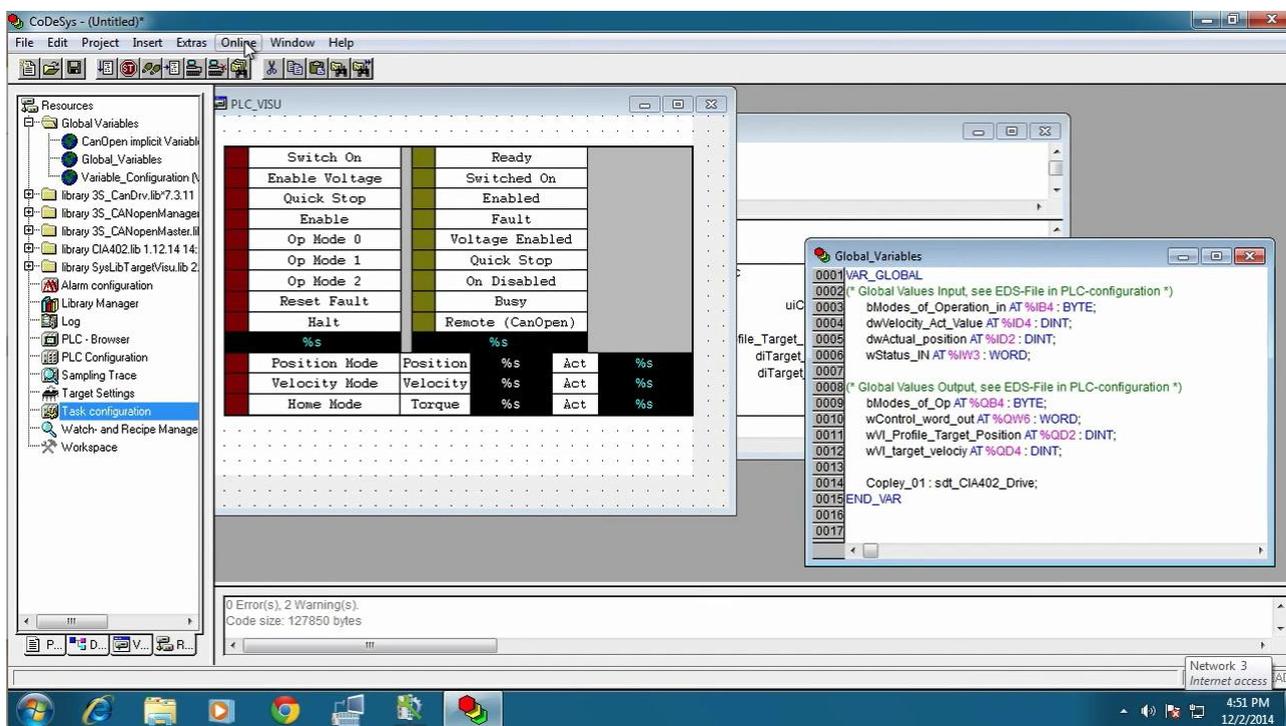


Рисунок 4.8 вставляем визуализацию в проект

Выбираем вкладку Visual и вставляем в проект файл визуализации, перед этим назвав его main. Визуализация прописана в файле библиотеки CIA 402 и появляется автоматически, ее нужно только выровнять с белым прямоугольником, чтобы она полностью поместилась на экране операторской панели. На этом создание проекта закончено, компилируем, Debug и выбираем

download, тем самым записываем в операторскую панель. Далее просто связываемся Online. И управляем двигателем (Рис. 4.9).

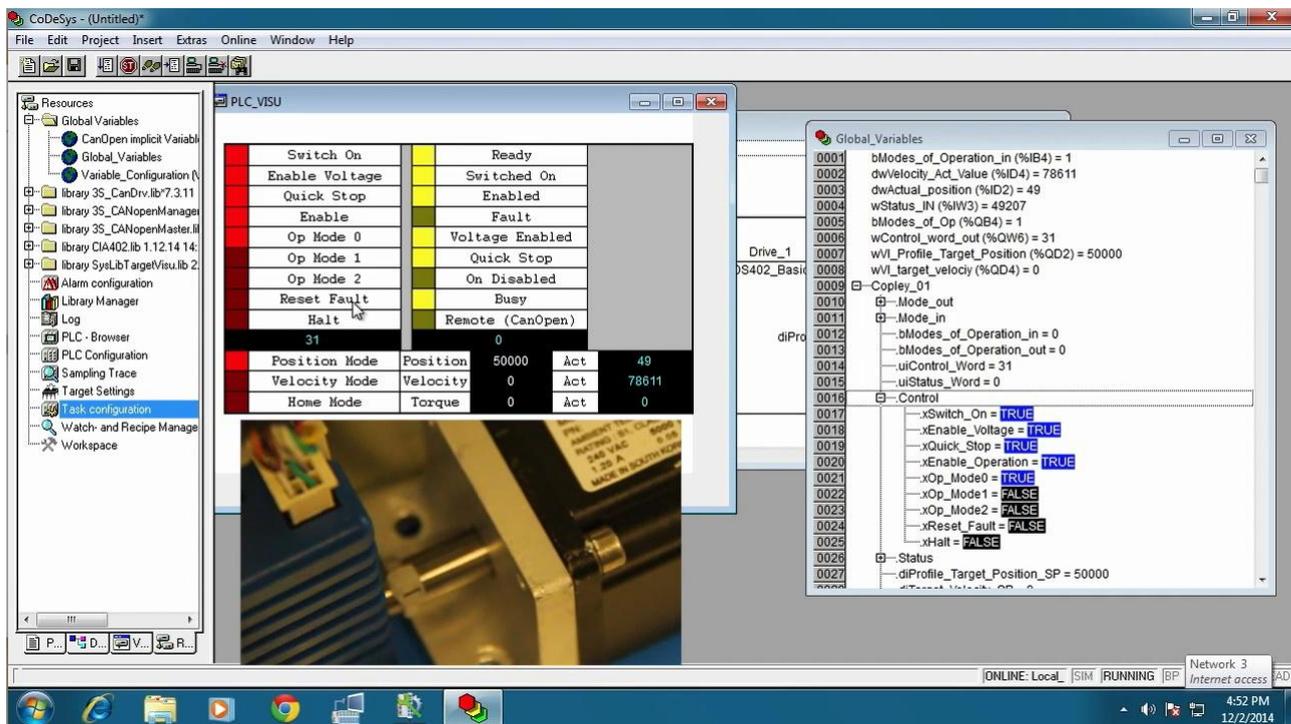


Рисунок 4.9 после отладки и записи в операторскую панель управляем вращением двигателя.