

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, д.т.н., проф.
_____ /Дегтярь В.Г./
_____ 20__ г.

Разработка цифровой системы управления приводом антенны

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ — 13.03.02.2018.166.03 ПЗ ВКР

Проверил, (к.т.н., доцент)
_____ /П.О. Шабуров/
_____ 20__ г.

Автор работы
студент группы П – 428
_____ /М. С. Белоусов/
_____ 20__ г.

Нормоконтролёр (к.т.н., доцент)
_____ /П.О. Шабуров/
_____ 2018г.

АННОТАЦИЯ

Белоусов М.С. Разработка цифровой системы управления приводом антенны – Челябинск: ЮУрГУ, П-428, 79 стр., ил., библиогр. список – 17 наим.

Цель – использовать современные вычислительные средства и новейшую элементную базу для модернизации аналоговой системы автоматического управления антенной колонны.

Задачи – изучить отечественную и зарубежную литературу по данному вопросу, разработать математическую модель системы автоматического управления, а также разработать электрическую схему для этой системы.

Рассматриваемая цель, является актуальной в современном машиностроении, так как при переходе с аналоговой техники на цифровую, улучшаются большинство параметров системы управления и становится возможен переход на быстрое массовое и дешёвое производство.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Белоусов М.С.			Разработка цифровой системы управления приводом антенны	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Шабуров П. О.					2	79
Реценз.						ЮУрГУ Летательные аппараты		
Н. Контр.		Шабуров П. О.						
Утверд.		Дектярь В.Г.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СИСТЕМА САМОНАВЕДЕНИЕ ЗЕНИТНО УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ И ИХ ВИДЫ.....	7
1.1 Радиолокационный системы самонаведения.....	7
1.2 Оптические системы самонаведения.....	7
1.3 Пассивные системы самонаведения.....	9
1.4 Активная система самонаведения.....	9
1.5 Полуактивная система наведения.....	9
2 ИСХОДНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ.....	12
2.1 Принцип работы исходной системы автоматического управления.....	15
2.2 Математическая модель исходной системы автоматического управления.....	16
2.2.1 Расчет математической модели ДПТ.....	16
2.2.2 Расчет передаточной функции тахогенератора.....	19
2.2.3 Расчет передаточной функции тиристорного преобразователя.....	19
2.2.4 Расчет передаточной функции вращающегося трансформатора.....	20
2.2.5 Расчет передаточной функции редуктора.....	22
2.2.6 Математическая модель изначальной системы управления.....	22
3 МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННЫ.....	24
3.1 Выбор элементов для цифровой системы управления.....	25
3.1.1 Вентильный электродвигатель.....	25

3.1.2	Выбор датчика положения ротора	28
3.1.3	Выбор тахогенератора.....	32
3.1.4	Выбор датчиков тока.....	32
3.2	Расчет модели двигателя постоянного тока эквивалентный вентильному электродвигателю	34
3.3	Расчет передаточных функций для используемых датчиков.....	38
3.4	Настройка математической модели с использованием регуляторов.....	39
3.4.1	Принцип подчинённого регулирования.....	39
3.4.2	Настройка контура тока	42
3.4.3	Настройка контура скорости	45
3.4.4	Настройка контура положения.....	49
3.5	Моделирование системы в разных режимах.....	50
4	РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННЫ	55
4.1	Блок питания платы	55
4.1.1	Силовая часть блока питания.....	56
4.1.2	Информационная часть блока питания	57
4.1.3	Блок управления платы.....	60
4.1.4	Блок связи и прошивки	66
4.1.5	Блок контроля – состояния схемы	68
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	72
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	75

ВВЕДЕНИЕ

В наше время одной из самых актуальных задач является модификация процессов в механизмах и приборах, используемых человечеством. Одним из способов модификации является переход от аналоговых систем управления к цифровым. С развитием цифровой техники, многие механизмы и вычислительные машины были заменены и улучшены, но многое еще осталось неизменным. Этот вопрос остается актуальным и для наземной техники.

Главными преимуществами цифровой техники является универсальность, гибкость, практически неограниченные возможности по модификации алгоритмов обработки информации. Процессоры используются как в бытовых приборах для простейших программ управления команд, так и в сложнейших измерительных системах для цифровой обработки сигналов.

Целью выпускной квалификационной работы, является модификация системы управления привода антенны за счёт перехода от аналоговой системы управления на цифровую, которая позволяет уменьшить массогабаритные параметры, а также увеличить быстродействию системы.

В соответствие с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

Аналитические задачи

1 Провести анализ возможных вариантов модернизации и оптимизации ныне существующей системы управления антенны.

Проектные задачи

1 Рассчитать и составить математическую модель системы автоматического управления системы.

2. Разработать принципиальную электрическую схему для платы управления СПДМ для привода антенны.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. В соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ подобрать необходимые номиналы радиоэлементов платы управления исполнительным органом поворота сопла ракеты.

Предмет исследования – математическое моделирование и силовая электроника.

Объект исследования – математическая модель системы автоматического управления и платы управления СПДМ для привода антенны.

Степень разработанности в литературе – при создании системы управления привода антенны, вопрос увеличения быстродействия системы ставился неоднократно и всегда являлся решающим при проектировании готового решения управления исполнительным органом системы управления. Но конкретного технического решения, дающего возможность снизить вышеуказанные показатели за счёт внедрения микропроцессорной техники, на сегодня в научной литературе не приведено.

Научная новизна – заключается в снижении массогабаритных размеров системы управления, а также увеличения быстродействия привода антенны, за счёт перехода от аналоговой техники к цифровой, данный подход, позволит взглянуть на работу системы управления по-новому.

Не стоит забывать, что данная работа будет полезным не только для учебных целей, но и для научной и оборонной деятельности страны.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 СИСТЕМА САМОНАВЕДЕНИЕ ЗЕНИТНО УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ И ИХ ВИДЫ

Система самонаведения зенитно-управляемой ракеты (ЗУР) это комплекс устройств обеспечивающий, автоматическое наведение на цель при минимальном участии человека и внешних средств управления.

Главным компонентом системы самонаведения в зенитное управляемой ракете является головка самонаведения. Головка самонаведения осуществляет сопровождение цели т.е. определяет ошибку и формирует команды управления ракеты.

Единственное что требуется для головки самонаведения, это положение цели, которое она может узнать с помощью различных излучений поступающей от цели.

По виду излучений, поступающих от цели системы самонаведения, разделяют на:

- радиолокационное излучение
- оптическое излучение (инфракрасное или тепловое, световое, лазерное и др.)

1.1 Радиолокационный системы самонаведения

Радиолокационные системы самонаведения широко распространены в зенитно-ракетных комплексах ввиду их устойчивости к различным метеорологическим условиям и возможности наведения ракеты на цель любого типа и на различные дальности. Они могут использоваться на всем или только на конечном участке траектории зенитной управляемой ракеты.

1.2 Оптические системы самонаведения

Оптические системы самонаведения можно разделить на:

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

– Инфракрасные (тепловые) системы самонаведения

Инфракрасные системы самонаведения зенитных ракет используют диапазон волн инфракрасного излучения, находящийся в пределах от 0,74 мкм до 2000 мкм. Главным достоинством инфракрасных систем самонаведения является возможность применения пассивного способа самонаведения, об этом будет рассказано позже. Такая система самонаведения делается более простой, а ее действие скрытым от противника. До запуска зенитно-управляемой ракеты цели трудно обнаружить такую систему, а после запуска ракеты создать ей активную помеху. Приемник инфракрасной системы конструктивно выполняется выполнен значительно проще приемника радиолокационной головки самонаведения.

Минусами системы является малый радиус действия, а также зависимость от метеорологических условий. Неблагоприятные условия, такие как дождь, туман, и т.д., и т.п., уменьшают дальность действия системы. При наведении на цель инфракрасной системы самонаведения большую роль играет положение цели в пространстве, связано это с тем что инфракрасное излучение излучается неравномерно, что так же оказывает влияние на дальность действия.

Тепловые системы самонаведения широко используются в зенитных комплексах ближнего боя малой дальности, например, в ПЗРК.

– Световые системы самонаведения

Принцип работы световых систем самонаведения основаны на том, что воздушные цели чаще всего лучше отражают свет, чем окружающий их фон. Более лучшее отражение позволяет выделить цель на общем фоне и навести на нее зенитную ракету с помощью головки самонаведения, осуществляющей прием сигнала в диапазоне видимой части спектра электромагнитных волн.

Преимуществом данной системы является возможность применения пассивного способа самонаведения. Ее существенный недостаток – дальность действия очень сильно зависит от метеорологических условий. В случае хороших метеорологических условиях световая система самонаведения невозможно, а также

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

наведение невозможно в направлениях, с которых в поле зрения угломера системы попадает световое излучение Солнца или Луны.

Системы самонаведения различают также и по первичному источнику излучения:

- пассивными;
- активными;
- полуактивными.

1.3 Пассивные системы самонаведения

Пассивное самонаведение основывается на излучении генерируемое самой целью или отраженном излучении, источником которого является естественные излучатели (Солнце). Исходя из этого, информация о координатах и параметрах движения цели получается без специального облучения цели (рисунок 1.1 а)

1.4 Активная система самонаведения

Система активного самонаведения основывается на том, что источник излучения, облучающий цель, устанавливается на ракете и для самонаведения зенитно-управляемой ракеты используется отраженное от цели излучение этого источника рисунок 1.1 в.

1.5 Полуактивная система наведения

Система полуактивного самонаведения основывается на том, что источник излучения, облучающий цель, располагается вне цели или ракеты, например, радиолокатор подсвета находящийся на пусковой установке, при радиолокационном самонаведении рисунок 1.1 б.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

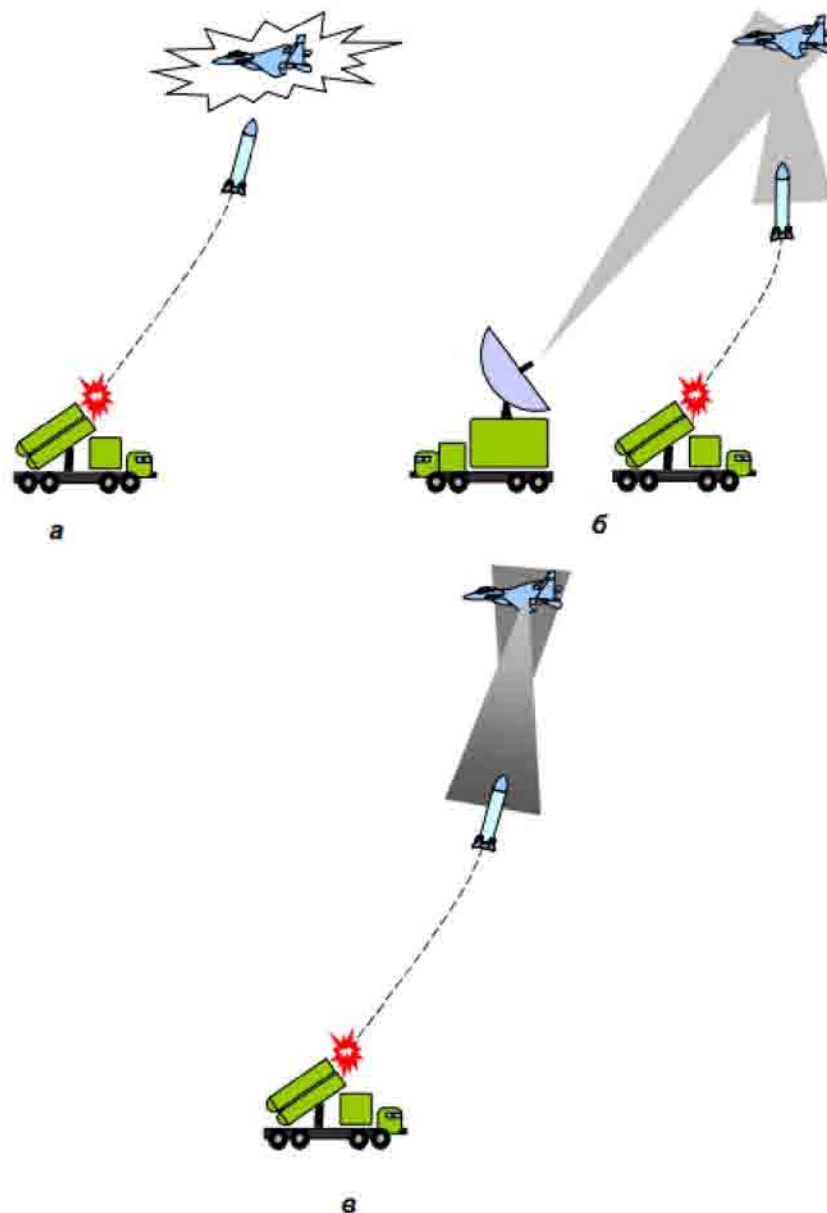


Рисунок 1.1 – Системы самонаведения

а – пассивная; б – полуактивная; в - активная

Самым распространенным способом является полуактивное радиолокационное самонаведение. Первичный источник излучения (радиолокатор подсвета цели) может располагаться либо прямо на пусковой установке (ЗРС С – 300В), либо на определенном расстоянии от места пуска ракеты (на радиолокаторе подсвета цели).

Задачей радиолокатора подсвета цели является непрерывное облучение цели радиоволнами. В радиолокационной станции используется направленное

излучение радиоволн, что требует непрерывного сопровождения цели по угловым координатам. Для решения других задач обеспечивается также сопровождение цели по дальности и скорости. Таким образом, наземная часть системы полуактивного самонаведения представляет собой радиолокационную станцию с автоматическим сопровождением цели.

Полуактивная головка самонаведения устанавливается на ракете и включает в себя координатор и счетно-решающий прибор. Она обеспечивает захват и сопровождение цели по угловым координатам, дальности или скорости (или по всем 3-м координатам), определение параметра ошибки и выработку команд управления.

В комбинированных системах применяются как полуактивная, так и активная системы самонаведения. Ограничение по дальности активной системы самонаведения происходит за счет максимальной мощности первичного излучения, которую можно получить на ракете с учетом возможных габаритов и массы бортовой аппаратуры, в том числе и антенны головки самонаведения.

Для вычисления параметра ошибки и выработки команд управления, следящие системы головки самонаведения должны непрерывно отслеживать цель. При этом формирование команды управления возможно при сопровождении цели только по угловым координатам. Однако такое сопровождение не обеспечивает селекцию цели по дальности и скорости, а также защиту приемника головки самонаведения от побочной информации и помех.

Для автоматического сопровождения цели по угловым координатам используются равносигнальные методы пеленгации. Угол прихода отраженной от цели волны определяется сравнением сигналов, принятых по двум или более несовпадающим диаграммам направленности. Сравнение может осуществляться одновременно или последовательно.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ИСХОДНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ

Целью моей выпускной квалификационной работы является разработка модифицированной системы автоматического управления приводом антенны пусковой установки 9А83 (рисунок 2.1), входящей в состав ракетной системы противовоздушной / противоракетной обороны С – 300В. С – 300В предназначена для защиты важных войсковых объектов, группировок войск и административно-промышленных центров от ударов всех типов самолётов и вертолётов, крылатых ракет, других аэродинамических средств воздушного нападения, аэробаллистических и баллистических ракет оперативно-тактического назначения.

Пусковая установка 9А83 предназначена для подготовки и запуска четырёх зенитных управляемых ракет 9М83, используемые для борьбы с аэродинамическими целями (метеоритами), крылатыми ракетами и тактическими баллистическими ракетами. Ракеты могут быть размещены как на самой пусковой установке в транспортно-пусковых контейнерах 9Я240, так и на сопряжённой с ней пуско-заряжающей установке 9А85. Перевод ракет в боевое положение производится специальными гидроприводами. Установка обеспечивает работу зенитно-управляемых ракет от момента их запуска до поражения цели, осуществляет подсветку цели, а также выдачу корректирующих команд. Подготовка ракет к запуску выполняется при поступлении команд от многоканальной станции наведения ракет 9С32. Установка способна вести огонь двумя из четырёх ракет с интервалом 1...2 секунды. Во время работы 9А83 происходит постоянный обмен информацией с 9С32, производится анализ целеуказания и отображение положения цели в зоне поражения.

В комплект бортовой аппаратуры установки 9А83 входят:

–устройство для установки транспортно-пускового контейнера в стартовое положение (гидроприводом);

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

- радиоэлектронная аппаратура со специальной электрической вычислительной машины;
- аппаратура предстартовой подготовки системы самонаведения зенитно-управляемой ракеты;
- аппаратура стартовой автоматики;
- аппаратура предстартовой подготовки инерциальной системы управления зенитно-управляемой ракеты;
- станция подсвета цели;
- аппаратура навигации, топопривязки и ориентирования;
- аппаратура телекодовой связи;
- система автономного электроснабжения на базе газотурбинного генератора;
- система жизнеобеспечения.



Рисунок 2.1 – Пусковая установка 9А83.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Ракета 9М83 использует комбинируемую систему наведения, на начальном этапе ракета наводится с помощью полуактивной радиолокационной системы наведения, а при приближении к цели происходит её захват с помощью аппаратуры самонаведения.

Подсвет цели для полуактивной радиолокационной системы наведения происходит с помощью радиоэлектронной аппаратуры, установленной на антенной колонне ДП51.

Технические данные блока ДП51:

- Масса блока ДП51;
- 2050 кг.

Ограничение вращения по углам в пределах:

- азимут: от $+270 \pm 0,9$ до $-270 \pm 0,9$;
- места: от $+94,98 \pm 0,9$ до $-4,98 \pm 0,9$.

Одним из важнейших узлов антенной колонны является система автоматического управления рисунок 2.2

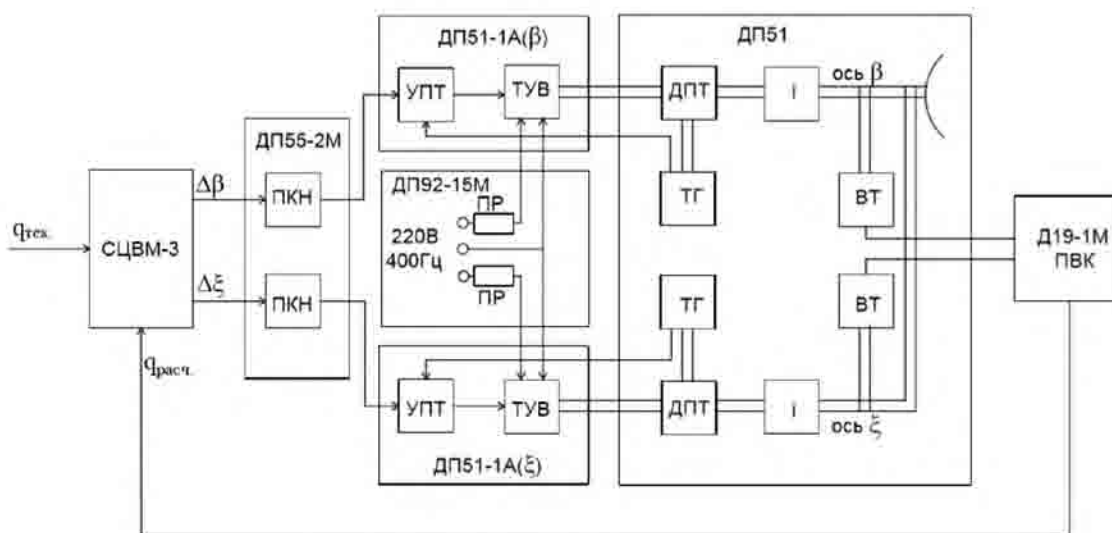


Рисунок 2.2 – Система автоматического управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2.1 Принцип работы исходной системы автоматического управления

Наведение антенны на объект осуществляется по координатам цели (X, Y, Z) поступающим в специализированную вычислительную машину (СЦВМ – 3) от многоканальная станция наведения ракет (МСНР). Сигнал "β" или "ε" в виде двоичного кода поступает из СЦВМ – 3 в преобразователь “код – напряжение” (ПКН), расположенный в боке ДП55 – 2М, преобразуется в электрическое напряжение постоянного тока и с выхода преобразователь “код – напряжение” поступает в усилитель постоянного тока (УПТ) блоков ДП51 – 1А (β), (ε). Где суммируется с напряжением обратной связи (выход тахогенератора). Просуммированный сигнал поступает на вывод управления тиристорного выпрямителя, который преобразует поступающее напряжение 220В 400Гц, из блока ДП92 – 15М, в постоянное напряжение, которое поступает на силовой двигатель.

Исполнительные двигатели силовых приводов преобразуют постоянное выпрявленное напряжение в угловое перемещение выходного вала антенны. На оси антенны установлен вращающийся трансформатор, который преобразует угловое перемещение вала вращающийся трансформатора в синусоидальное напряжение. Это напряжение поступает в преобразователь “напряжение – код” блока Д19 – 1М.

В преобразователь “вал – код” синусоидальное напряжение вращающегося трансформатора преобразуется в двоичный код $q_{\text{тек}}$, пропорциональный текущему значению координат $\beta(\gamma)$, или $\varepsilon(\psi)$, который с вывода преобразователя “вал – код” поступает в СЦВМ–3, где происходит выделение сигнала "β" или "ε" по формуле

$$\Delta = q_{\text{расч}} - q_{\text{тек}} \quad (1)$$

Ошибка наведения Δ обрабатывается СУА, при этом оси антенны совмещается с направлением на цель.

В качестве силовых двигателей используется двигатель постоянного с тока с возбуждением от постоянных магнитов ДП172 – 550 – 3,0 – Д09, наименование

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

остальных составных частей в связи с тем, что завод имени Калинина не разрабатывал эту колонну у меня не было.

Из основных недостатков системы управления можно выделить:

- необходимость частого обслуживания двигателя постоянного тока, из-за наличия щеточно-коллекторного узла;
- высокие масса-габаритные параметры системы из-за наличия двигателя постоянного тока и тиристорного управления;
- малая скорость оцифровки значений, получаемых с ВТ, преобразователем “вал-код”, не более 5 мс;
- низкая разрядность преобразователя “код – напряжение”, 6 разрядов + знак;
- помехи и наводки при передаче данных из преобразователя “код – напряжение” в усилитель постоянного тока.

2.2 Математическая модель исходной системы автоматического управления

Для более наглядного сравнения систем настроим математическую модель системы

2.2.1 Расчет математической модели ДПТ

Составим математическую модель двигателя, использующегося в нашей установке.

На практике чаще всего используют следующую упрощенную модель. Это объясняется тем, что двигатель ДП172 – 550 – 3,0 – Д09, это двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Из-за этого поток двигателя можно считать постоянным, и структурная схема двигателя получает вид рисунок. 2.3

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

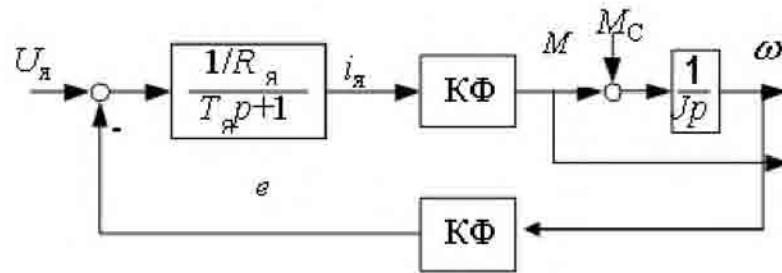


Рисунок 2.3 – Структурная схема двигателя постоянного тока при постоянном потоке

В таблице 1 представлены данные двигателя ДП172 – 550 – 3,0 – Д09, которые я получил во время преддипломной практики на заводе. [1].

Таблица 1 – Характеристики ДП172 – 550 – 3,0 – Д09

Мощность	550 Вт
Напряжение питания	60 В
Количество пар полюсов	1
Номинальная скорость вращения вала	3000 обр./мин 314.159 рад/с
Скорость вращения вала при холостом ходу	3350 обр./мин 350.811 рад/с
Номинальный момент	1,75 Нм
Номинальный ток	11,2 А
Момент инерции	$7,15 \cdot 10^{-4}$ кг/м ²
Ток холостого хода	1,1 А

Для составления математической модели нам необходимо знать:

- напряжение на двигателе;
- номинальный момент;
- момент инерции;
- сопротивление обмотки двигателя;
- электромагнитную постоянную времени якорной обмотки;
- КФ машины;

КФ машины определяется так

$$K\Phi = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}} - I_{\text{ХХ}}} \quad (2.1)$$

$$K\Phi = \frac{1.75}{11.2 - 1.1} = 0.17327$$

Э.Д.С выражение определим так ·

$$E_a = K\Phi \cdot \omega_{\text{НОМ}} \quad (2.2)$$

$$E_a = 0.17327 \cdot 314.159 = 54.433$$

Сопротивления обмотки якоря определим так

$$R_a = \frac{U - E_a}{I_{\text{НОМ}}} \quad (2.3)$$

$$R_a = \frac{60 - 54.433}{11.2} = 0.497 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки возбуждения определяется так

$$L_a = \frac{8 \cdot U}{2 \cdot p \cdot \omega_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}}} \quad (2.4)$$

$$L_a = \frac{8 \cdot 60}{2 \cdot 1 \cdot 314.159 \cdot 11.2} = 0.0682 \text{ Гн}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной обмотки определяется так

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.5)$$

$$T_a = \frac{0.0682}{0.497} = 0.13724$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

2.2.2 Расчет передаточной функции тахогенератора

В качестве датчика скорости в системе управления колонный используется тахогенератор. Тахогенератор можно представить в виде безынерционного звена тем самым пренебрегая его постоянной времени.

Крутизна тахогенератора составляет 6мВ/обр./мин. Но в модели скорость измеряется в радианах в секунду, для этого воспользуемся формулой

$$W_{\text{ТХ}} = \frac{S_{\text{ТХ}}}{0.104} \quad (2.6)$$

где $S_{\text{ТХ}}$ – крутизна тахогенератора

$$W_{\text{ТХ}} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0.104} = 0.05769$$

2.2.3 Расчет передаточной функции тиристорного преобразователя

Тиристорный преобразователь вместе с системой управления можно представить в виде апериодического звена.

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{I_{\text{п}}(s)}{U_{\text{y}}(s)} = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}} \cdot s + 1} \quad (2.7)$$

где $T_{\text{ТП}} = T + t$;

t – время запаздывания силовой части тиристорного преобразователя, этой величиной можно пренебречь.

В этом случае

$$T_{\text{ТП}} = \frac{1}{m \cdot f} \quad (2.8)$$

где m - количество фаз напряжения питания, $m=3$

f - источника питания, $f=400$ Гц

тогда

$$T_{\text{ТП}} = \frac{1}{3 \cdot 400} = 0.000833$$

$$K_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{у}}} \quad (2.9)$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение двигателя, $U_{\text{н}} = 60$ В,

$U_{\text{у}}$ – максимальное напряжение управления, $U_{\text{у}} = 27$ В,

тогда

$$K_{\text{ТП}} = \frac{60}{27} = 2.222$$

Передаточная функция тиристорного преобразователя в численном значении будет иметь вид

$$W_{\text{ТП}}(S) = \frac{2.222}{0.000833 \cdot S + 1}$$

Так как постоянная времени передаточную функцию тиристорного преобразователя мала, то тиристорный преобразователь можно представить в виде безынерционным звеном типа $W_{\text{ТП}}=2.222$

2.2.4 Расчет передаточной функции вращающегося трансформатора.

Вращающийся трансформатор — это электрическая машина переменного тока, предназначенная для преобразования угла поворота в электрическое напряжение, амплитуда которого пропорциональна или является функцией угла. [5].

При этом его выходное напряжение

$$U_{\text{ВТ}} = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_2^*) \quad (2.10)$$

Информационным сигналом этого звена является величина фазового сдвига выходного напряжения, т.е. φ_2^* относительно опорного. Следует иметь в виду, что коэффициент передачи вращающегося трансформатора, работающего в фазовом режиме, равен 1.

Передачная функция задается в виде

$$W_{\text{ВТ}}^* = \frac{\varphi_2^*}{\varphi_2} = K_{\text{ВТ}} = 1 \quad (2.11)$$

Так как выходной сигнал вращающегося трансформатора мал, то чаще всего вместе с ним последовательно включают преобразователь-фаза напряжение. Он выполняется много отсчётным. Выходное напряжение 27 В. Передачная функция находится по выражению

$$W_{\text{ФН}} = \frac{27}{\varphi_{\text{сум}}} \quad (2.12)$$

где $\varphi_{\text{сум}}$ - суммарный фазовый сдвиг, соответствующий максимальному углу поворота. Для нашей системы равен 540 град., но т.к. в нашей системе угол снимается в радианах то приведём его в радианы т получим 10.317 радиана.

$$W_{\text{ФН}} = \frac{27}{10.317} = 2.617$$

Теперь объединив наши составляющие получим передачную функцию для нашего вращающегося трансформатора

$$W_{\text{ВТ}} = W_{\text{ВТ}}^* \cdot W_{\text{ФН}} \quad (2.13)$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

$$W_{BT} = 1 \cdot 2.617 = 2.617$$

2.2.5 Расчет передаточной функции редуктора

Так же не стоит забывать, что про то что в системе используется редуктор. Передаточное число, которого умноженное на его КПД = 0.025, на модели представим редуктор в безынерционным звеном типа $W_{ред}=0.025$.

2.2.6 Математическая модель изначальной системы управления

Теперь имея все данные составим математическую модель нашей системы в программе Mat lab Simulink рисунок 2.3

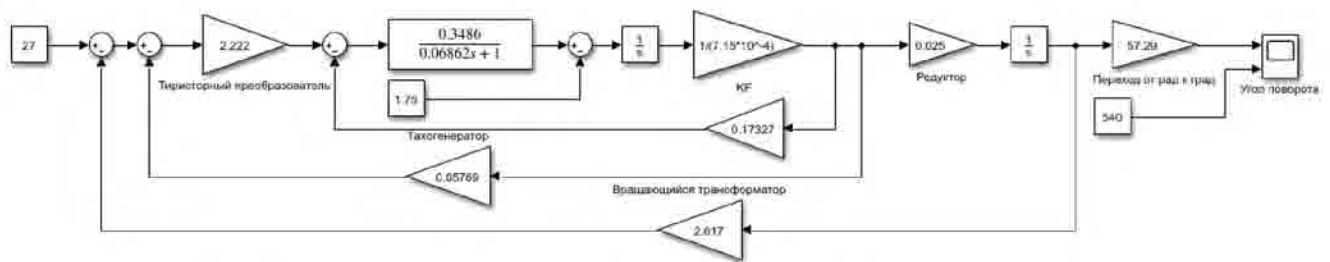


Рисунок 2.3 – Модель системы в программе Mat lab Simulink

Согласно имеющийся у меня информации изначальная система выполняла переброс антенны из положения -270 град в положение +270 градусов за 12 секунд. Результаты, полученные на рисунке 2.4 подтверждают это, что говорит о правильности расчета системы. На рисунке толстой красной линией показано изначальное задание на 540 градусов, что аналогично развороту с -270 до +270 градусов, а черной угол поворота вала, на котором находится антенна.

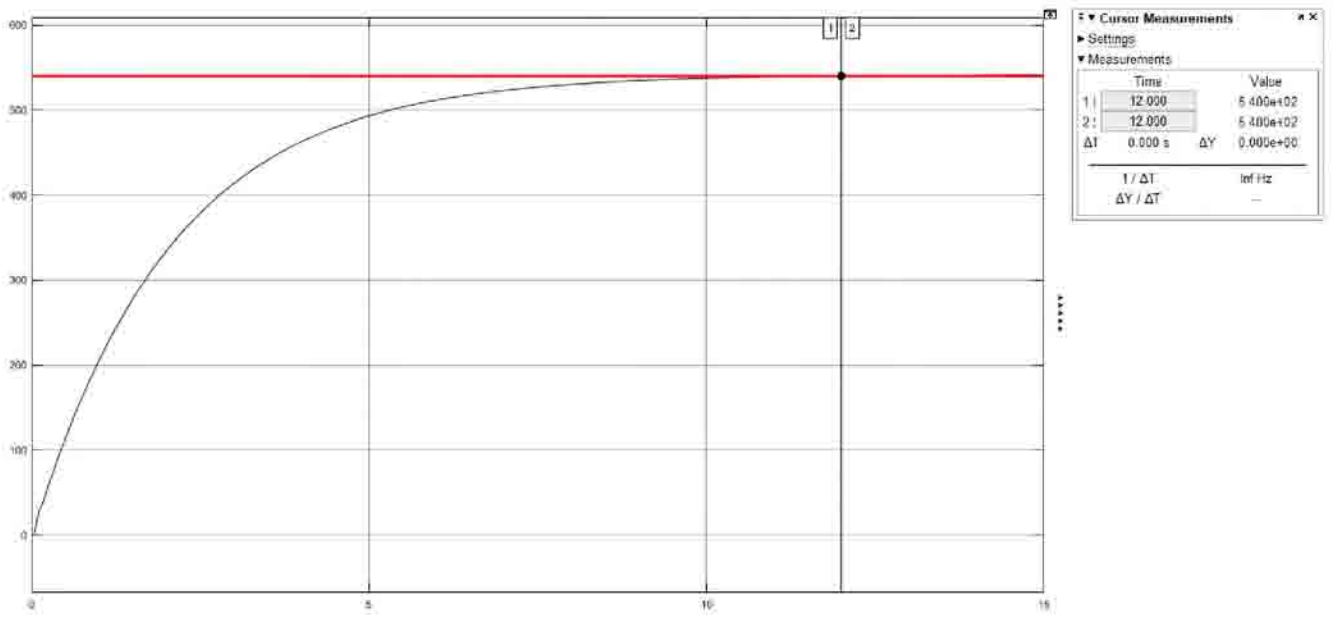


Рисунок 2.4 – График зависимости угла поворота вала от времени

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3 МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННЫ

В связи со всеми вышеперечисленными недостатками требуется модернизация системы.

Мною было предложена следующая системы управления антенной использующая цифровую систему управления

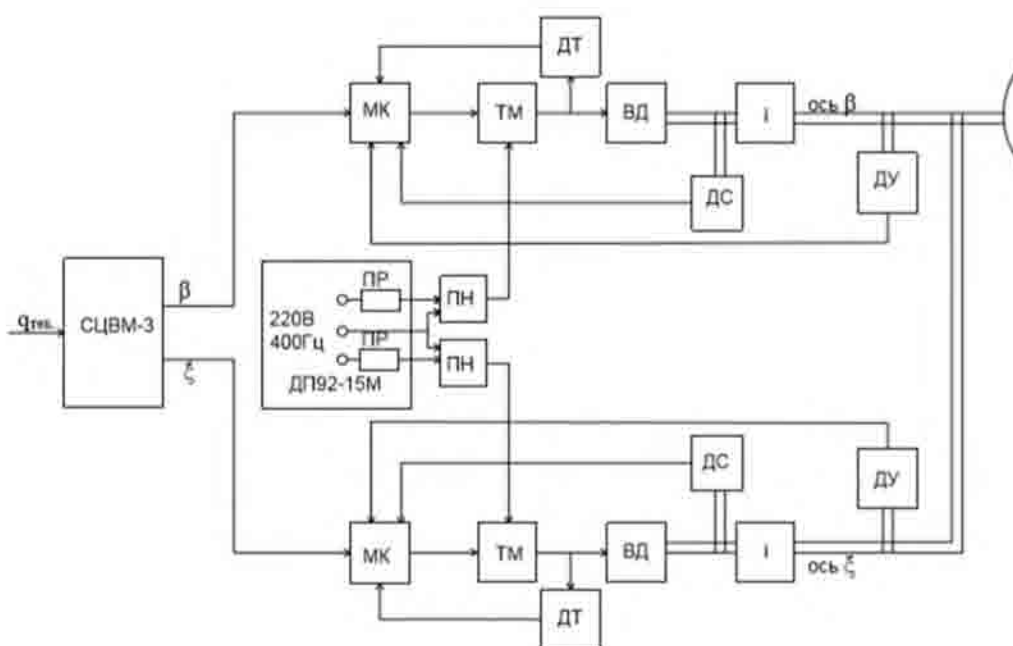


Рисунок 3.1 – Цифровая система автоматического управления

Цифровая система автоматического управления работает по следующему принципу.

Сигнал, поступающий от многоканальной станции наведения ракет в виде координат цели (X, Y, Z) в специализированной вычислительной машину (СЦВМ – 3) преобразуется в сигналы " β " или " ξ " затем в виде двоичного кода поступает в микроконтроллер. В микроконтроллере происходит обработка сигнала с учетом данных получаемых от датчиков тока, скорости и положения. С микроконтроллера сигнал в виде ШИМ поступает на драйверы, которые управляют

транзисторами, управляющие Синхронным двигателем с постоянными магнитами, иначе говоря вентильный электродвигатель, который вращает антенну через редуктор

3.1 Выбор элементов для цифровой системы управления

В первую очередь стоит определиться с выбором двигателя для системы управления. Сразу же стоит отказаться от идеи использования двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Потому что одним из основных недостатков двигателей постоянного тока является наличие щеточно-коллекторного контакта. Который приводит к дополнительным потерям, требования к профилактическому обслуживанию коллекторно-щёточных узлов, снижает надёжность установки.

3.1.1 Вентильный электродвигатель

Вентильный электродвигатель (ВД) — это один разновидностей электродвигателей переменного тока, в котором питание происходит с помощью полупроводникового коммутатора, управляемого различными датчиками положения ротора.

Механические и регулировочные характеристики вентильного электродвигателя линейны и максимально приближены к механическим и регулировочным характеристикам электродвигателя постоянного тока. Вентильные электродвигатели, как и электродвигатели постоянного тока, питаются от сети постоянного тока. Вентильный электродвигатель можно рассмотреть, как электродвигатель постоянного тока, в котором щеточно-коллекторный контакт заменён силовой электроникой, что объясняет слово «вентильный», то есть «управляемый силовыми ключами» (вентильями).

Под вентильным электродвигателем можно понимать, как и бес коллекторный двигатель постоянного тока, который имеет трапецеидальное форму

					ЮУрГУ — 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

магнитного поля в зазоре, так и синхронный двигатель с постоянными магнитами противо-ЭДС которого синусоидальная.

В англоязычной литературе такие электродвигатели обычно рассматриваются вместе с электроприводом и упоминаются под аббревиатурами PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) или BLDC (Brushless Direct Current Motor). Аббревиатура PMSM чаще всего используется для обозначения синхронных машин с постоянными магнитами и с синусоидальной формой фазных противо-ЭДС, в это же время аббревиатура BLDC аналогична русской аббревиатуре относится к электродвигателям с трапецеидальной формой противо-ЭДС.

Вентильный электродвигатель сложно назвать электрической машиной в обычном понимании, поскольку его проблемы затрагивают такие вопросы, связанные с теорией электропривода и системами автоматического управления: структурной организацией, использованием датчиков и электронных компонентов, а также программный код для управления двигателем.

Вентильные электродвигатели, сочетают в себе надёжность машин переменного тока с отличной управляемостью машин постоянного тока, и являются, пока, единственной альтернативой двигателю постоянного тока, которые имеют определенные проблемы, связанные со щеточно-коллекторным контактом, таких как искрение, помехи, износ щёток, плохой теплоотвод якоря и пр. Отсутствие щеточно-коллекторного контакта позволяет применять вентильных электродвигатель в тех условиях, где использование двигателя постоянного тока затруднено или невозможно.

Вентильный двигатель состоит из ротора, представленного в виде постоянного магнита, вращающегося в магнитном поле катушек статора, по которым проходит ток, коммутируемый ключами, которыми управляет микроконтроллер. Микроконтроллер включает катушки таким образом, чтобы создаваемое поле статора всегда взаимодействовала с полем ротора тем самым создавая крутящий момент при любом его положении ротора.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Как правило, электронная часть вентильного электродвигателя коммутирует фазы статора машины так, чтобы вектор магнитного потока статора был перпендикулярен вектору магнитного потока ротора. При соблюдении перпендикулярности полей статора и ротора достигается и поддерживается максимальный момент вентильного электродвигателя в условиях изменения частоты вращения, что позволяет предотвратить выпадение ротора из синхронизма и обеспечить работу машины с максимально возможной для неё КПД. Для определения положения ротора вместо датчика положения ротора можно использовать токовые датчики позволяющие косвенно определить положение ротора.

В электронную часть современного вентильного электродвигателя входит микроконтроллер и силовые транзисторы, а для формирования фазного тока применяют принцип широтно-импульсной модуляции. Микроконтроллер способен отслеживать соблюдение законов управления, и производить диагностику системы и её программную защиту от аварийных ситуаций.

Также датчик положения ротора может отсутствовать, а положение ротора оценивается с помощью системы управления по измерению токовых датчиков с помощью наблюдателей. В таком случае за счёт удаления дорогостоящего датчика положения ротора уменьшается цена и массогабаритные показатели электропривода с вентильным электродвигателем, однако это усложняет управление, и снижается точность определения положения ротора и скорости вращения.

Для данной системы управления мною был выбран вентильный электродвигатель 5ДВМ115 А 6 3 Т1 О4,

где:

- А – длительный момент, $M_d = 2,3$ Нм;
- 6 максимальная скорость вращения вала, $n_{max} = 6000$ обр./мин = 628 рад/с;
- 3 напряжение шины постоянного тока, $U_{dc} = 300$ В;

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- $2p = 6$;
- Момент инерции ротора $3,74 \text{ кг}\cdot\text{см}^2$.

Согласно ГОСТ 183 номинальный режим работы вентильных электродвигателей, работающих в режиме S1, Номинальным режимом является при моменте на валу не более $1 M_d$, при скорости вращения от 0 по $0,25 n_{\max}$, с моментом не более $0,8 M_d$ при частотах вращения свыше $0,25 n_{\max}$ по $0,5 n_{\max}$ и с моментом не более $0,5 M_d$ при частотах вращения свыше $0,5 n_{\max}$ по n_{\max} . Двигатели допускают работу в режимах S2 - S8 при указанных ограничениях моментов, допускаются кратковременные перегрузки с моментом не более $5 M_d$. Согласно этому ГОСТу, и тому что режим работы у двигателя будет S1, номинальным режимом работы в нашем случае будет при значениях $M_n = 1.75 \text{ Нм}$, а $w_n = 3000 \text{ обр./мин} = 314 \text{ рад/с}$

3.1.2 Выбор датчика положения ротора

В качестве датчика положения ротора, а также датчиком поворота угла антенны, был выбран высоко динамичный фотоэлектрический цифровой преобразователь угла абсолютного отсчёта повышенной точности, стойкости и надёжности с полым валом и встроенной муфтой ПФ – ДЭ – 16 – 100.

Среди обширного класса измерительных преобразователей угловых перемещений абсолютные преобразователи углового перемещения занимают особое место. Эти преобразователи позволяют решать задачи прецизионных измерений не только величин угловых перемещений, но и без потери точности могут обеспечить «жесткую» координатную привязку различного рода позиционируемых объектов при их статическом положении.

Абсолютные преобразователи ставят в соответствие каждому значению углового положению вала преобразователя значение числового эквивалента,

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

который формируется на выходе преобразователя, как правило, в виде сигнала цифрового кода. При этом указанное взаимно однозначное соответствие сохраняется, как при движении вала, так и при его неподвижном положении и не требует возвращения вала в начальную позицию. Таким образом, значение кода не теряется после выключения и включения питания преобразователя, восстанавливается после прохождения помехи или превышения допустимой скорости вращения вала, ограничиваемой правильным считыванием кода.

Эталоном угловой меры служит кодовая шкала (лимб), имеющая одностороннюю или многостороннюю кольцевую структуру. Упрощенное изображение лимба с девятью дорожками кодовой шкалы изображено на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Лимб с девятью дорожками кодовой шкалы.

В основе принципа действия таких преобразователей лежит анализ позиционного сочетания уровней сигналов дискретных фотоприемников, располагаемых в формируемой светотеневой картине соответствующих концентрических кольцевых кодовых дорожек или на одной дорожке (в случае одностороннего кода).

Совокупность указанных фотоприемников образует считывающее фото приёмное устройство (матрицу считывающих фотоприёмников), конкретное выполнение которого определяется структурой используемого кода и конструкцией преобразователя.

В зависимости от уровня сигналов, снимаемых с фотоприемников, им присваиваются значения 0 или 1, то есть получаемые кодовые комбинации являются бинарными кодами.

В абсолютных преобразователях увеличение количества кодовых разрядов соответствует увеличению их угловой разрешающей способности.

По диапазону измерений абсолютные преобразователи делятся на однооборотные и многооборотные. В преобразователях первого типа кодирование углового положения вала осуществляется в пределах изменения угла поворота от 0° до 360°. В многооборотных преобразователях рабочий диапазон превышает 360°.

Они строятся на основе абсолютных однооборотных преобразователей, последовательно соединённых между собой через двоичные понижающие редукторы. Как правило, используется один преобразователь точного отсчёта и один или несколько преобразователей грубого отсчёта. Точный отсчёт используется для преобразования в цифровой код в пределах одного оборота вала, а грубые – для счёта числа оборотов. Для уменьшения погрешностей, вносимых редукторами и преобразователями грубого отсчёта, применяются электронные методы согласования грубых и точных отсчётов.

Принцип работы фотоэлектрических датчиков положения заключается в следующем, формируемый осветителем 1,2 пучок лучей создаёт в плоскости анализирующей маски 4 теневое изображение кодовой шкалы 3. Анализирующая маска, представляет собой совокупность щелевых диафрагм, выделяющих необходимые для анализа участки изображения кодовой шкалы. За каждой диафрагмой по ходу лучей установлен дискретный фотоприемник, располагаемый в зоне теневого изображения соответствующей кольцевой дорожки кодовой шкалы. В распространённом случае считывающее фото приёмное устройство представляет собой анализирующую маску в виде одной узкой щелевой диафрагмы с установленной за ней линейкой фотодиодов.



Рисунок 3.3 – Считывающее устройство.

Здесь 1 – излучающий диод, 2 – конденсатор, 3 – кодовая шкала, 4 – анализирующая маска, 5 – дискретный фотоприёмник.

Конструктивно абсолютный преобразователь включает в себя оптико-механический узел, оптико-электронное считывающее устройство, а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприёмников.

Оптико-механический узел преобразователя представляет собой корпусную деталь с прецизионными направляющими, обеспечивающими вращательное движение вала с лимбом.

Оптико-электронное считывающее устройство содержит узел осветителя и считывающее фото приёмное устройство, а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприёмников.

В общем случае, считывающее фото приёмное устройство содержит матрицу пространственно-распределённых фотоприёмников с установленной перед ними анализирующей маской [15].

Параметры ПФ – ДЭ – 16 – 100:

- Диапазон измерений, угловые градусы: 0 — 360
- Число двоичных разрядов выходного кода угла: 16
- Тип выходного кода: Двоичный натуральный

- Тип интерфейса: Параллельный, последовательный
- Информационная ёмкость, бит: 65536
- Дискретность преобразования, q : 20"
- Характер вращения вала: Реверсивный
- Предельная рабочая частота вращения вала, об/мин: 600
- Напряжение источника питания, В: $5 \pm 5\%$
- Потребляемая мощность не более, Вт: 7
- Период обновления информации не более, мкс.:
- — параллельный выход 1
- — последовательный выход 3
- Максимальное значение погрешности E2, q : 1 класс $\pm 10''$

3.1.3 Выбор тахогенератора

В качестве датчика скорости, в корпусе выбранного вентильного электродвигателя используется синхронный тахогенератор ТС45 – 0,85 – 2

Тахогенератор — является измерительным генератор постоянного или переменного тока, использующийся для преобразования мгновенного значения угловой скорости вращения вала в пропорциональный со скоростью электрический сигнал.

Обычно величина (ЭДС), а в некоторых типах тахогенераторов и частота сигнала прямо пропорциональны частоте вращения ротора.

Параметры тахогенератора ТС45 – 0,85 – 2:

Крутизна, мВ/(об/мин): 0,85

Частота вращения, об/мин: 6000

3.1.4 Выбор датчиков тока

В качестве датчиков тока были выбраны датчики тока ACS712ELCTR – 20А –Т. Датчики тока ACS712ELCTR – 20А – Т обеспечивают

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

экономное и прецизионное решение для измерения как постоянных, так и переменных токов в промышленных, автомобильных, коммерческих системах и системах связи. Корпус устройства обеспечивает удобную реализацию для пользователя. Устройство состоит из прецизионного линейного датчика тока на базе эффекта Холла с медным проводником на нижней части. Прикладываемый к медному проводнику ток создает, улавливаемое датчиком, магнитное поле, которое преобразуется в пропорциональное напряжение. Точность устройства оптимизирована за счет непосредственной близости от магнитного сигнала к датчику. Напряжение обеспечивается ViCMOS Hall микросхемой с низким смещением и заводскими настройками точности. [8]

Преимущества датчиков ACS712:

- аналоговый сигнал с низким уровнем шума;
- полоса пропускания устройства устанавливается через вывод FILTER;
- маленький размер, низкий профиль;
- внутреннее сопротивление проводника 1.2мОм;
- выходное напряжение пропорционально AC или DC токам;
- чувствительность на выходе от 66 до 185мВ/А;
- заводская подстройка для точности;
- очень стабильное напряжение смещения на выходе;
- почти нулевой магнитный гистерезис;
- логотрический выход источника питания;

Параметры датчика ACS712ELCTR-20A-T:

- рабочая температура: от -40 до 85
- диапазон измеряемых токов, А: ± 20
- чувствительность, мВ/А: 100

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

3.2 Расчет модели двигателя постоянного тока эквивалентный вентильному электродвигателю

Так как модель вентильного электродвигателя сложно реализовать, то для простоты моделирования рассчитывают эквивалентный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

Эквивалентными, можно назвать машины с разными паспортными данными – необходимо оговаривать условия приведения. Во-первых, эквивалентная машина должна быть той же мощности. Во-вторых, должна иметь тот же пусковой момент и скорость идеального холостого хода. В-третьих, машины должны иметь одинаковый конструктивный коэффициент K и магнитные системы (КФ). Первые два критерия чаще всего соблюдаются. А вот КФ эквивалентного ДПТ можно уравнивать либо с константой противо-ЭДС (K_e), либо с моментной константой (K_t). Возможны и другие варианты.

Разработчики системы управления хотят обходиться простым решением – выбрать настройки регуляторов для привода на эквивалентном ДПТ и перенести их в более сложную систему управления для машины переменного тока. В этом случае следует уравнивать КФ и K_e . Но константа противо-ЭДС связывает скорость вала и амплитудное значение ЭДС в обмотках. Поэтому, например, для питания эквивалентного трехфазного СДПМ, чьи обмотки соединены в звезду, необходима машина постоянного тока с напряжением в корень из трёх раз больше (что определено отношением линейного напряжения к фазному). Если мы проектируем не новый электропривод, а меняем машину постоянного тока на бесколлекторную в существующем, то пересмотр величины бортового напряжения недопустим. Поэтому эквивалентными, в том числе, можно называть машины с учётом масштабирования питающего напряжения. [2]

Пересчёт параметров поддерживается для машин с числом фаз кратным цифрам 3 и 4. Условием выбрано $U_{\text{я}} = U_{dc}$ (равенство линейного и фазного напряжений). Просчёт осуществляется по следующим формулам:

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

$$K\Phi = K_e; \quad (3.1)$$

$$R_{я} = 2 \cdot \frac{R_s}{m}; \quad (3.2)$$

$$L_{я} = 2 \cdot \frac{L_s}{m}; \quad (3.3)$$

$$E_{я} = U_{фм}; \quad (3.4)$$

$$I_{я} = \frac{I_{фм} \cdot m}{2}; \quad (3.5)$$

где

Z_p – Число пар полюсов у машины $Z_p = 1, 2, 3, \dots$;

m – Число фаз статора;

$K\Phi$ – Коэффициент преобразования тока в момент и угловой скорости в ЭДС;

I_a – Номинальный ток якоря;

U_a – Номинальная противо-ЭДС двигателя (принято допущение $E=U$);

R_a – Активное сопротивление якоря;

L_a – Индуктивность обмотки якоря;

K_e – Константа противо-ЭДС (для амплитудного значения);

K_t – Моментный коэффициент (для амплитудного значения тока статора);

I_m – Амплитудное значение номинального тока фазы статора;

U_{dc} – Напряжение шины постоянного тока (при векторной ШИМ и допущении $E=U$);

I_{dc} – Ток моста (при векторной ШИМ);

R_s – Активное сопротивление фазы статора (в два раза меньше, чем измеряемое между линиями);

L_s – Индуктивность фазы статора (в два раза меньше, чем измеряемая между линиями);

Ψ_s – Модуль потокосцепления обмотки статора с магнитным полем ротора.

От разработчиков вентильного двигателя были получены следующие данные:

$\Psi_s = 0.172$ Вб;

$$Z_p = 3;$$

$$R_s = 5.08 \text{ Ом};$$

$$L_s = 0.324 \text{ Гн};$$

$$U_{dc} = 300 \text{ В}$$

$$I_{dc} = 1.96 \text{ А}$$

$$I_{\Phi M} = 2.26 \text{ А}$$

$$m = 3$$

$$K_e = 0.515$$

$$K_t = 0.772$$

Подставим значения в полученные формулы и найдём параметры для эквивалентного двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов:

$$K\Phi = 0.515;$$

$$R_{\text{я}} = 3.39 \text{ Ом};$$

$$L_{\text{я}} = 0.216 \text{ Гн};$$

$$E_{\text{я}} = 173 \text{ В};$$

$$I_{\text{я}} = 3.39 \text{ А};$$

Конструктивный коэффициент электрической машины, определяемый для любой электрической машины (переменного или постоянного тока), зависящая от её конструкции, чьё произведение на мгновенное значение потока, $K\Phi$, определяет коэффициент трансформации между электрической энергией и механической. В машине постоянного тока $K\Phi$ связывает мгновенные значения тока якоря и электромагнитного момента: $M(t) = K\Phi \cdot i$. А также мгновенные значения угловой скорости вала и противо-ЭДС: $e = K\Phi \cdot \omega(t)$. В машинах переменного тока, с числом секций обмотки (с числом фаз) равным m , $K\Phi$ связывает векторную сумму мгновенных значений токов секций обмотки статора и электромагнитный момент:

$M(t) = K\Phi \cdot \sqrt{\frac{m}{2}} t \cdot I_m(t)$. А так же угловую скорость вала с векторной суммой

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

мгновенных значений противо-ЭДС секций обмотки статора: $\sqrt{\frac{m}{2}} \cdot E_m(t) = K\Phi \cdot \omega(t)$. Направления для составляющих векторных сумм задают геометрические положения секций обмотки статора. [2]

Константа противо-ЭДС, определяемая для электрических машин переменного тока (СД, АД), чьи секции соединены в звезду, а противо-ЭДС синусоидальна, связывающая амплитудную величину противо-ЭДС фазы и угловую скорость вала при номинальном потоке: $K_e = \frac{E_{\phi m}}{\omega}$.

Моментная константа, определяемая для электрических машин переменного тока (СД, АД), чьи секции соединены в звезду, а противо-ЭДС синусоидальна, связывающая электромагнитный момент и амплитудную величину тока одной фазы при номинальном потоке: $K_t = \frac{M}{I_{\phi m}}$.

В инженерной практике константа противо-ЭДС и моментная константа введены в связи с тем, что разработчикам цифровой системы управления для электропривода, прежде всего, необходимо контролировать соответствие амплитудных значений токов и напряжений полным шкалам АЦП и предельным значениям регистров сравнения ШИМ-драйвера. Кроме того, в системах управления, преобразователи Кларка и Парка связывают именно амплитудные значения с мгновенными фазными.

У машин переменного тока, с числом секций обмотки равным m , моментная константа K_t в $\frac{m}{2}$ раз больше константы противо-ЭДС K_e :

$$K_t = \frac{m}{2} \cdot K_e \quad (3.6)$$

Если для машины переменного тока, с числом секций обмотки равным m , известна константа противо-ЭДС K_e или моментная константа K_t , то её конструктивный коэффициент умноженный на поток, $K\Phi$, можно вычислить по формулам:

$$K\Phi = K_e \cdot \sqrt{\frac{m}{2}} = \frac{K_t}{\sqrt{\frac{m}{2}}} \quad (3.7)$$

В паспорте трёхфазных машин переменного тока коэффициент КФ зашифрован в таком параметре как "градиент напряжения на 1000 об/мин" или "приращение скорости, в обр./мин, на вольт" (rpm/V). Вольтметры переменного тока измеряют действующее значение напряжения. И измерить можно лишь линейное напряжение на двигателе (нейтральную точку не выводят на калымную колодку). 1000 об/мин – это, приближённо, 100 рад/с. Поэтому коэффициент КФ можно получить, если первый параметр разделить на 100 или 10 разделить на второй параметр.

3.3 Расчет передаточных функций для используемых датчиков

Для создания математической модели нам требуется рассчитать передаточные коэффициенты используемых нами датчиков.

Расчет передаточной функции датчиков тока

В качестве датчика тока используется ACS712ELCTR-20A-T его характеристики описывались в разделе 3.1.4. Согласно принципу работы данного датчика тока, на основе тока, который он через себя пропускает генерирует определенное ЭДС, по сути это чувствительность датчика, коэффициент связывающий ток и генерируемое ЭДС и будет нашим передаточным коэффициентом, постоянной времени мы пренебрегаем в связи с тем, что данная модель почти не обладает магнитным гистерезисом. Тогда передаточная функция имеет вид

$$W_{\text{дт}}(s) = K_{\text{чувст}} \quad (3.8)$$

где – $K_{\text{чувст}}$ – Чувствительность датчика тока, 100 мВ/А

$$W_{\text{дт}}(s) = 0.1$$

Расчет передаточной функции датчика скорости

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В качестве датчика скорости у нас служит тахогенератор ТС45 – 0,85 – 2 расчет передаточной функции приводился в разделе 2.2.2, согласно формуле 2.6 получим.

$$W_{\text{ТХ}} = \frac{0.85 * 10^{-3}}{0.104} = 0.008173$$

Данные датчика ТС45 – 0,85 – 2, приведены в разделе 3.1.3.

Расчет передаточной функции датчика угла

В качестве датчика угла в системе используется ПФ – ДЭ – 16 – 100 это цифровой датчик положения сигнал, он оцифровывает значение угла поворота поэтому и представить его в виде безынерционного звена с единичным усилением.

Расчет передаточной функции редуктора

Ввиду отсутствия информации о механической части антенной колонны, расчёт редуктора невозможен поэтому был выбрано следующее передаточное число редуктора, умноженное на его КПД = 0.008. $W_{\text{ред}}=0.008$

3.4 Настройка математической модели с использованием регуляторов

Для обеспечения нормальной работы системы автоматического управления с учетом всех обратных связей воспользуемся принципом подчиненного регулирования обеспечивающего нормальную работу системы.

3.4.1 Принцип подчинённого регулирования

В процессе управления приводом регулируемая координата должна наилучшим образом воспроизводить изменения предписанного значения. Однако при этом часто оказывается необходимым ограничить пределы изменения одной или нескольких промежуточных координат (например, ток двигателя или его скорость при отработке углового перемещения). С этой целью одноконтурная

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

система дополняется обратными связями по промежуточным координатам, с помощью которых реализуются различные варианты схем их ограничения. Среди них наибольшее распространение получили системы, построенные по принципу подчиненного регулирования (см. рисунок 3.4).

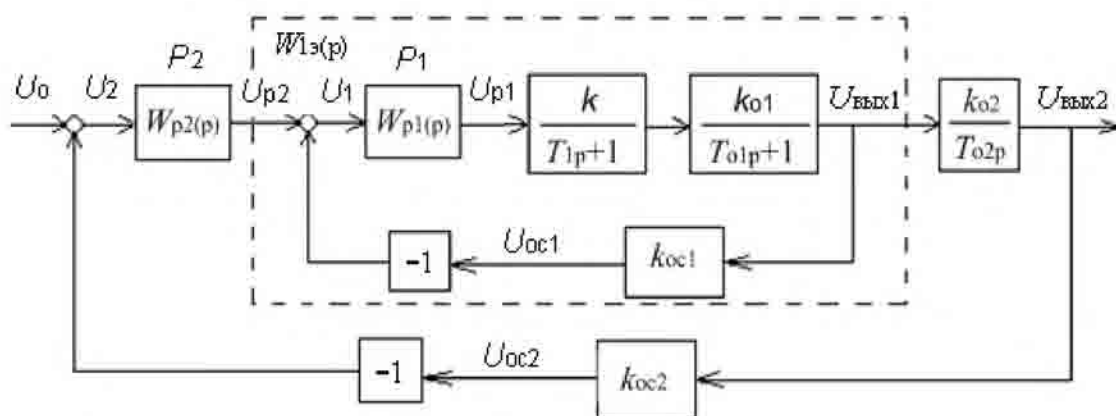


Рисунок 3.4 – Структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования

В системе предусмотрено два контура регулирования со своими регуляторами P_1 и P_2 , причем выходное напряжение регулятора внешнего контура u_{p2} является задающим напряжением для регулятора внутреннего контура. Выходное напряжение регулятора P_2 ограничено предельным значением $u_{p2огр}$. Поскольку выходное напряжение внутреннего контура $u_{вых1}$ определяется его задающим значением, т.е. выходным напряжением регулятора P_2 , оно не может превышать $u_{p2огр}$.

Применяя в рассматриваемой схеме ПИ-регулятор, можно реализовать стандартную настройку внутреннего контура, быстродействие которого будет определяться его малой постоянной времени $T_{\mu 1}$. При настройке на оптимум по модулю передаточная функция замкнутого контура запишется в виде:

Передаточную функцию разомкнутого контура, настроенного на оптимум по модулю, получим из выражения:

$$W_{\text{ж.замк}}(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{u_0(p)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p + 1} \quad (3.9)$$

$$W_{\text{ж.разомк}}(p) = \frac{W_{\text{ж.замк}}(p)}{1 - W_{\text{ж.замк}}(p)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1)} \quad (3.10)$$

В контуре может быть не одна, а несколько малых постоянных времени. Тогда $T_{\mu 1}$ будет представлять собой суммарную малую постоянную времени контура, а полученная передаточная функция замкнутого контура $W_{1\text{э}}(p)$ будет описывать его приближенно.

Передаточную функцию

$$W_{\text{к2}}(p) = W_{1\text{э}}(p) \frac{k_{\text{p2}}}{T_{\text{о2}} \cdot p} \cdot k_{\text{оc2}} \quad (3.11)$$

можно рассматривать как передаточную функцию неизменной части нового внешнего замкнутого контура, имеющего собственный регулятор P_2 с передаточной функцией $W_{\text{p2}}(p)$. Рассматривая замкнутый внутренний контур $W_{1\text{э}}(p)$ как звено с эквивалентной малой постоянной, параметры регулятора нужно выбирать так, чтобы исключить влияние на динамику внешнего контура эквивалентной постоянной времени $T_{1\text{э}}$. При расчете параметров регулятора внешнего контура внутренний замкнутый контур в соответствии с изложенным выше методом понижения порядка системы можно заменить аperiodическим звеном с передаточной функцией:

$$W_{1\text{э}}(p) \approx \frac{1/k_{\text{оc}}}{T_{1\text{э}} \cdot p + 1} \quad (3.12)$$

Здесь при настройке внутреннего контура на оптимум по модулю принимают $T_{1\text{э}} = 2T_{\mu 1}$. Если во внешнем контуре есть свои малые постоянные времени, то $T_{1\text{э}}$ входит как слагаемое в состав его суммарной малой постоянной времени.

Рассмотренный внешний контур может, в свою очередь, выступать как внутренний по отношению к третьему контуру и т.д. Такой принцип построения системы называется принципом подчиненного регулирования, так как работа каждого внутреннего контура подчинена внешнему контуру. Два главных достоинства определяют широкое распространение систем подчиненного регулирования.

Простота расчета и настройки. Система разбивается на ряд контуров. Каждый контур включает в себя регулятор, за счет придания которому определенных динамических свойств получается стандартная характеристика. Настройка в процессе наладки системы ведется, начиная с внутреннего контура. Поскольку передаточные функции регуляторов контуров простые, а оценка качества регулирования осуществляется по виду переходного процесса при скачке управляющего воздействия, настройка не вызывает затруднения.

Удобство ограничения предельных значений промежуточных координат системы. Поскольку выходной сигнал внешнего регулятора определяет значение выходной координаты внутреннего контура, ограничение последней осуществляется ограничением выходного сигнала регулятора внешнего контура.

Вместе с тем мы показали, что даже при отсутствии во внешнем контуре других звеньев с малыми постоянными времени, кроме внутреннего контура, его малая постоянная времени будет, по крайней мере, вдвое больше постоянной времени внутреннего контура. Это значительно ухудшает быстродействие системы при увеличении числа контуров. Поэтому системы подчиненного регулирования редко строятся с числом контуров более трех.

3.4.2 Настойка контура тока

В нашем случае система регулирования будет состоять из трех контуров: контура тока, контура скорости и контура положения.

Настроим контур тока на оптимум по модулю. Для этого составим передаточную функцию разомкнутого контура (см. рисунок 3.5):

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

$$W_{\text{разомк}}(p) = W_p(p) \cdot W_H(p), \quad (3.13)$$

где $W_H(p)$ – передаточная функция объекта регулирования (преобразователь напряжения, обмотка якоря и датчик тока);

$W_p(p)$ – передаточная функция регулятора тока.

Подставим выражения и получим:

$$W_{\text{разомк}}(p) = W_p(p) \cdot \frac{k_{\text{пн}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{я}}}{(T_{\text{ср}} \cdot p + 1)(T_{\text{я}} \cdot p + 1)} \quad (3.14)$$

где $k_{\text{пн}}$ – коэффициент усиления преобразователя напряжения;

$k_{\text{дт}}$ – коэффициент усиления датчика тока;

$k_{\text{я}}$ – коэффициент усиления обмотки якоря;

$T_{\text{ср}}$ – постоянная времени, определяемая частотой ШИМ;

$T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки якоря.

$k_{\text{я}}$, $T_{\text{ср}}$ и $T_{\text{я}}$ можно найти по следующим формулам:

$$k_{\text{я}} = \frac{1}{R_{\text{я}}}, \quad (3.15)$$

$$k_{\text{я}} = 0.29773,$$

$$T_{\text{ср}} = 0,636 \cdot dT, \quad (3.16)$$

$$T_{\text{ср}} = 0,636 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 3.18 \cdot 10^{-5} \text{ (с)},$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (3.17)$$

$$T_{\text{я}} = \frac{0.21633}{3.3587} = 0.06441 \text{ (с)},$$

где dT – период дискретизации.

На рисунке 3.5 датчику тока присвоен коэффициент усиления, равный 0.1.

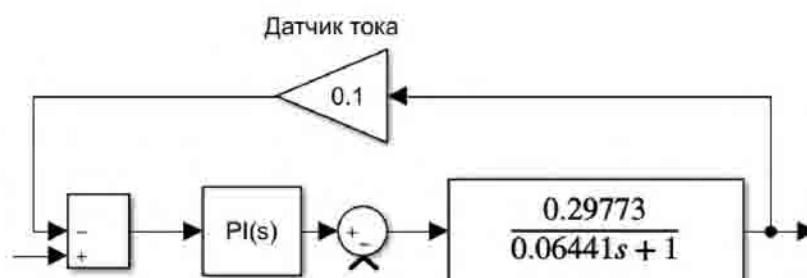


Рисунок 3.5 – Контур регулирования тока

Передаточная функция разомкнутого органа (3.14) должна соответствовать формуле (3.10). Приравняем эти формулы и найдем передаточную функцию регулятора, с помощью которого можно будет скомпенсировать влияние электромагнитной постоянной времени якоря и настроить систему на оптимум по модулю:

$$W_p(p) = \frac{1}{k_{ин} \cdot k_{дт} \cdot k_{я}} \cdot \frac{T_{я} \cdot p + 1}{2 \cdot T_{ср} \cdot p} \quad (3.18)$$

Или, если представить в виде ПИ-регулятора:

$$W_{рт}(p) = k_{рт} \cdot \frac{T_{рт} \cdot p + 1}{T_{рт} \cdot p}, \quad (3.19)$$

где $k_{рт}$, $T_{рт}$ – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора тока соответственно.

Тогда, приравняв (3.10) и (3.11), можно найти необходимые параметры ПИ-регулятора. Найдем постоянную времени регулятора тока:

$$T_{рт} = T_{я} = 0.0644 \text{ (с)}, \quad (3.20)$$

$$k_{\text{рТ}} = \frac{T_{\text{рТ}}}{2 \cdot T_{\text{ср}} \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{я}}}, \quad (3.21)$$

$$k_{\text{рТ}} = \frac{0.0644}{2 \cdot 3.18 \cdot 10^{-5} \cdot 178 \cdot 0.1 \cdot 0.29773} = 263,$$

3.4.3 Настройка контура скорости

В настроенной на оптимум системе будет существовать статическая ошибка регулирования по возмущению (если объект регулирования является идеальным интегратором):

$$W_{\text{р}}(p) = \frac{2 \cdot T_{\text{ср}}}{T_{\text{я}}} \cdot k_{\text{воз}} \cdot u_{\text{воз}}, \quad (3.22)$$

где $k_{\text{воз}}$, $u_{\text{воз}}$ – коэффициент усиления и величина возмущающего сигнала соответственно.

Для того, чтобы свести эту ошибку к нулю, снова можно использовать ПИ-регулятор (см. рисунок 3.6).

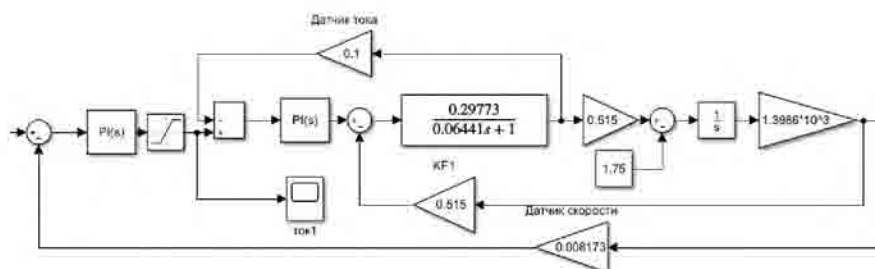


Рисунок 3.6 – Контур регулирования скорости

Настройка на симметричный оптимум подразумевает, что частотная характеристика разомкнутого контура скорости будет иметь изломы, симметричные относительно частоты среза, причем расстояние между частотой среза и изломом должен быть равен одной октаве (см. рисунок 3.7).

Как видно на рисунке, с помощью ПИ-регулятора мы можем задать частоту первого излома и частоту среза. Частоту правого излома задает частота среза контура тока. Так как расстояние между изломами должно быть равно 2 октавам, то частота левого излома будет равна:

$$T_{pc} = 4 \cdot T_{ср.т}, \quad (3.23)$$

$$T_{pc} = 4 \cdot 0.0644 = 0.2576 \text{ (с)},$$

$$\omega_{pc} = \frac{1}{T_{pc}}, \quad (3.24)$$

$$\omega_{pc} = \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-4}} = 3.8819 \text{ (Гц)}.$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Рисунок 3.7 – АЧХ звеньев контура скорости

Частота среза соответственно равна:

$$w_{cp,ск} = 2 \cdot w_{pc}, \quad (3.25)$$

$$w_{cp,ск} = 2 \cdot 3.8819 = 7.76 \text{ (Гц)}.$$

Для того, чтобы задать необходимую частоту среза, нужно скомпенсировать усиление dK объекта с помощью усиления ПИ-регулятора:

$$K_{\text{рск}} = \frac{1}{dK}. \quad (3.26)$$

Так как АЧХ объекта имеет наклон -20 дБ/дек, результирующее усиление объекта на частоте среза будет равно:

$$dK = \frac{K_{\text{о.ск}}}{w_{\text{ср.ск}}}, \quad (3.27)$$

где $K_{\text{о.ск}}$ – результирующий коэффициент усиления объекта на нулевой частоте:

$$K_{\text{о.ск}} = \frac{k\Phi \cdot q \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot k_{\text{дс}}}{J}, \quad (3.28)$$

где $k\Phi$ – конструктивный коэффициент двигателя;

q – передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора;

$\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя;

$k_{\text{дс}}$ – коэффициент усиления датчика скорости;

J – момент инерции вала двигателя и рабочего органа:

$$K_{\text{о.ск}} = \frac{0.515 \cdot 0.008 \cdot 0.7 \cdot 0.9 \cdot 0.008173}{0.5} = 11,8.$$

Вычислим коэффициент усиления ПИ-регулятора контура скорости:

$$K_{\text{рск}} = \frac{1}{0.2576 \cdot 11,8} = 100.$$

На этом расчет контура регулирования скорости окончен [2].

3.4.4 Настройка контура положения

Как и в предыдущем случае, нам нужно скомпенсировать влияние интегратора. В данном случае он реализует вычисление положения рабочего органа из его скорости перемещения (см. рисунок 3.8). Отличие состоит в том, что в цепи контура положения уже нет никаких дополнительных коэффициентов, которые нужно учитывать. Соответственно, коэффициент усиления регулятора положения равен (см. рисунок 3.9):

$$K_{кп} = \frac{1}{K_{и}} = w_{ср.пол}. \quad (3.29)$$

Частоту среза контура положения также возьмем на октаву меньше (настройка на оптимум по модулю):

$$w_{ср.пол} = 0.5 \cdot w_{ср.ск}, \quad (3.30)$$

$$w_{ср.пол} = 0.5 \cdot 46 = 23(\text{Гц}),$$

$$K_{кп} = 23.$$

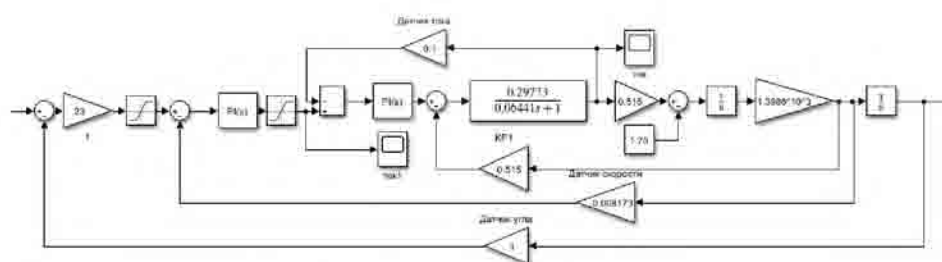


Рисунок 3.8 – Контур регулирования положения



Рисунок 3.9 – АЧХ звеньев контура положения

3.5 Моделирование системы в разных режимах

После всех расчетов соберем модель нашей системы в программе Mat lab Simulink рисунок 3.10

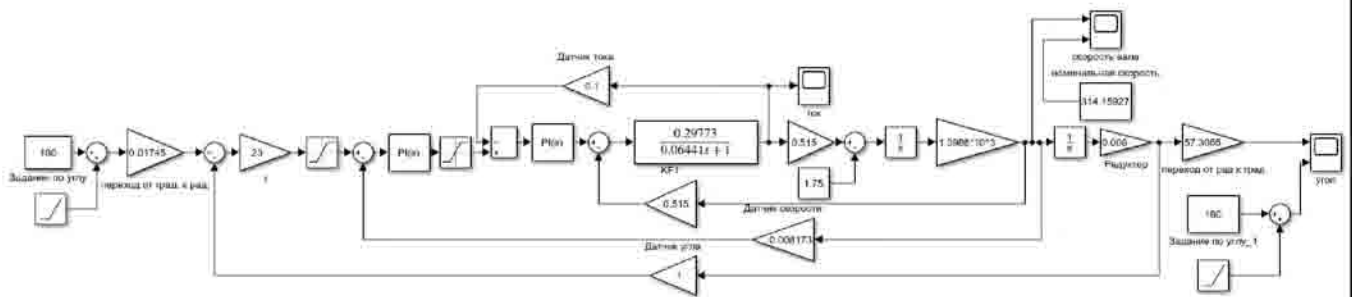


Рисунок 3.10 – Итоговый вид математической модели системы автоматического управления привода антенны.

Проведем моделирование системы с такими же условиями, перебор антенны из положения -270 градусов в $+270$ градусов рисунок 3.11

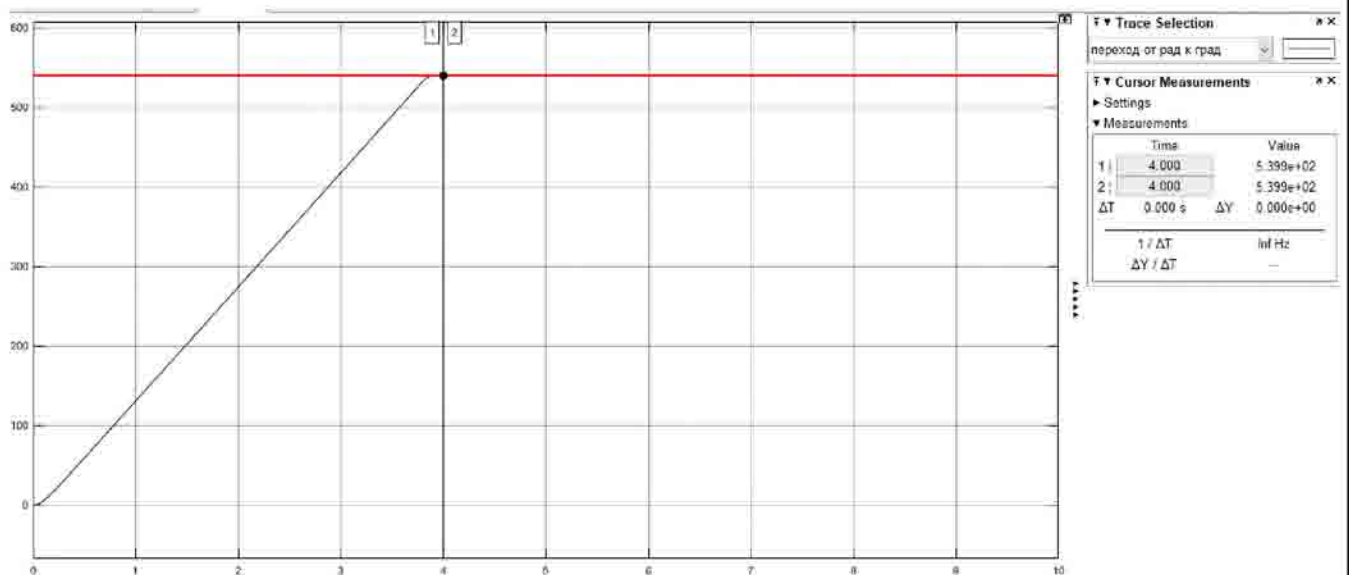


Рисунок 3.11 – График поворота антенны на угол в 540 градусов

Красным задается задание по углу, а черным угол поворота антенны как видно по рисунку быстродействие системы увеличилось в 3 раза при этом потерей в точности не наблюдается.

Ниже на графиках представляется график скорости (рисунок 3.12) и тока двигателя (рисунок 3.13)

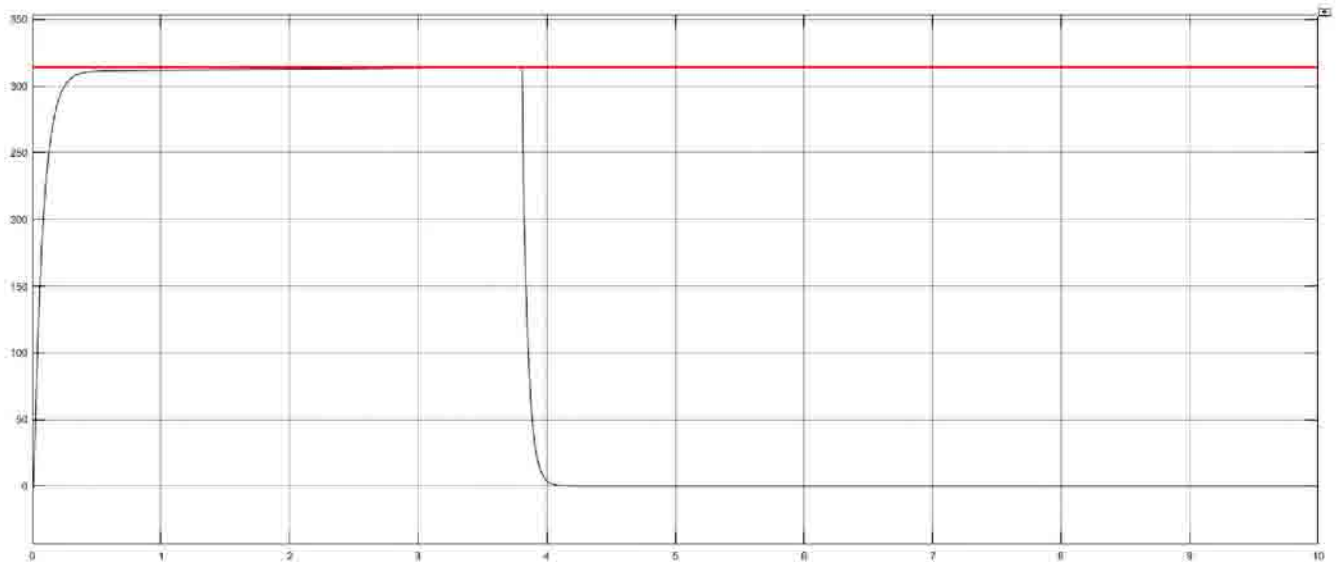


Рисунок 3.12 – Скорость вала двигателя

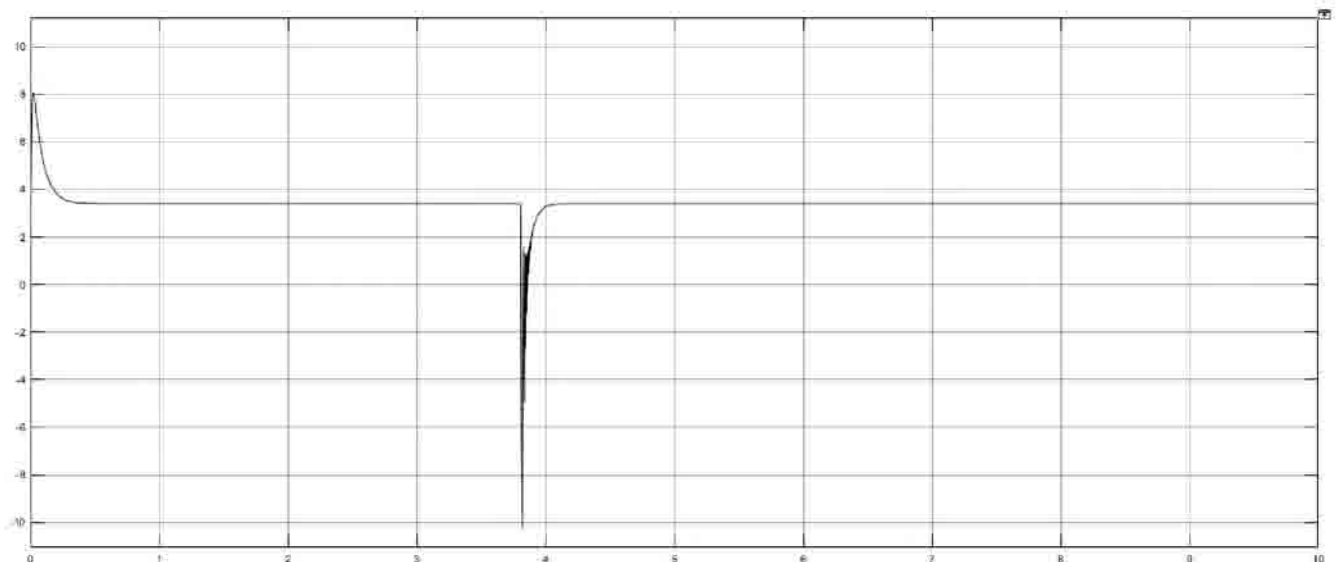


Рисунок 3.13 – Ток обмотки якоря

Согласно графикам, скорость не выходит за номинальную, как и ток.

Промоделируем систему в динамике т.е. задание будет постоянно меняться, как это чаще всего бывает на практике. Пусть изначальное положение цели будет = 180 градусам, а его скорость равна 10, получим следующие результаты моделирования этого режима представлены на рисунках 3.14, 3.15, 3.16. На рисунке 3.14 угол поворота с заданием. На рисунке 3.15 скорость вала с номинальной. На рисунке 3.16 ток обмотки якоря

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

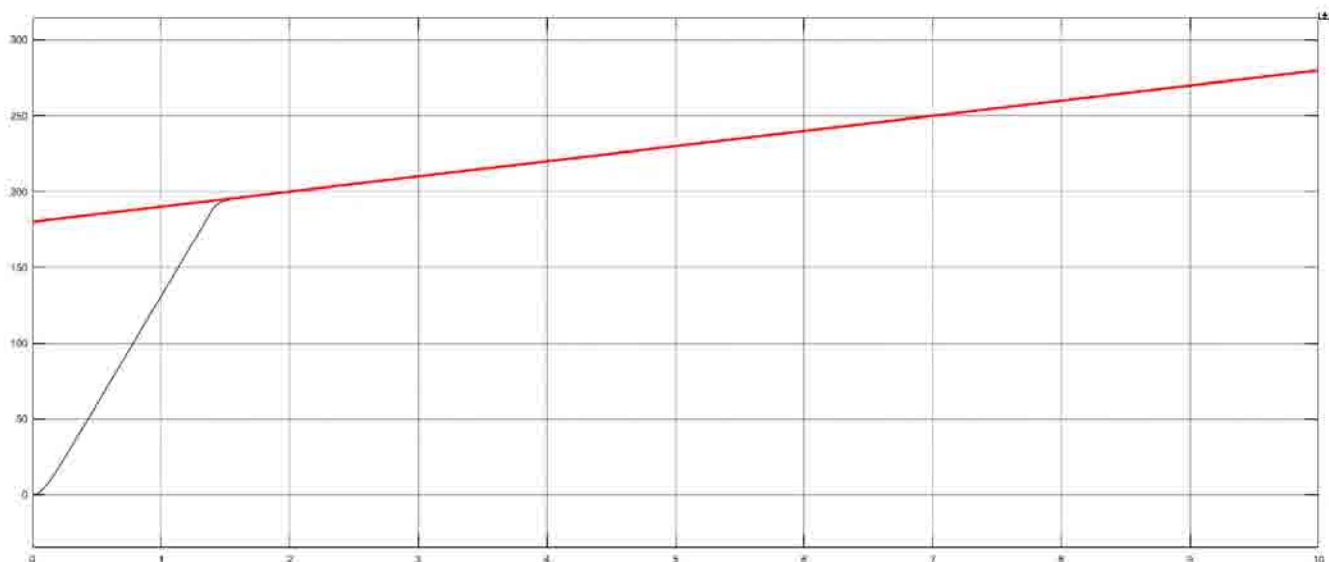


Рисунок 3.14 – Отработка угла в динамике

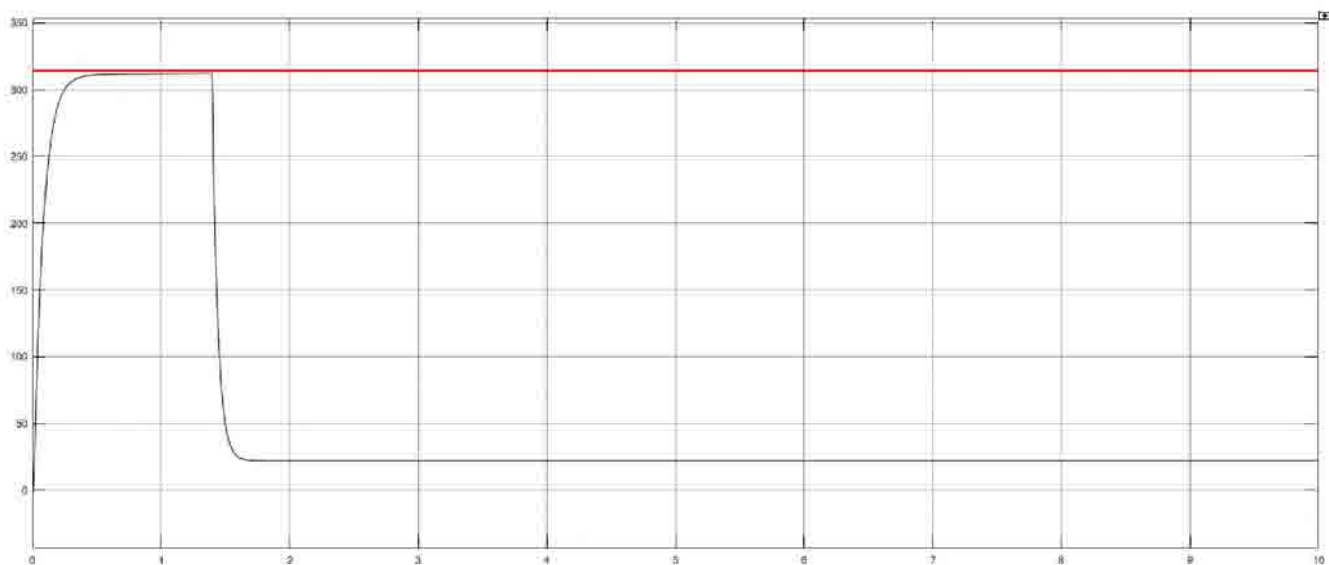


Рисунок 3.15 – скорость вала в работе в динамике

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

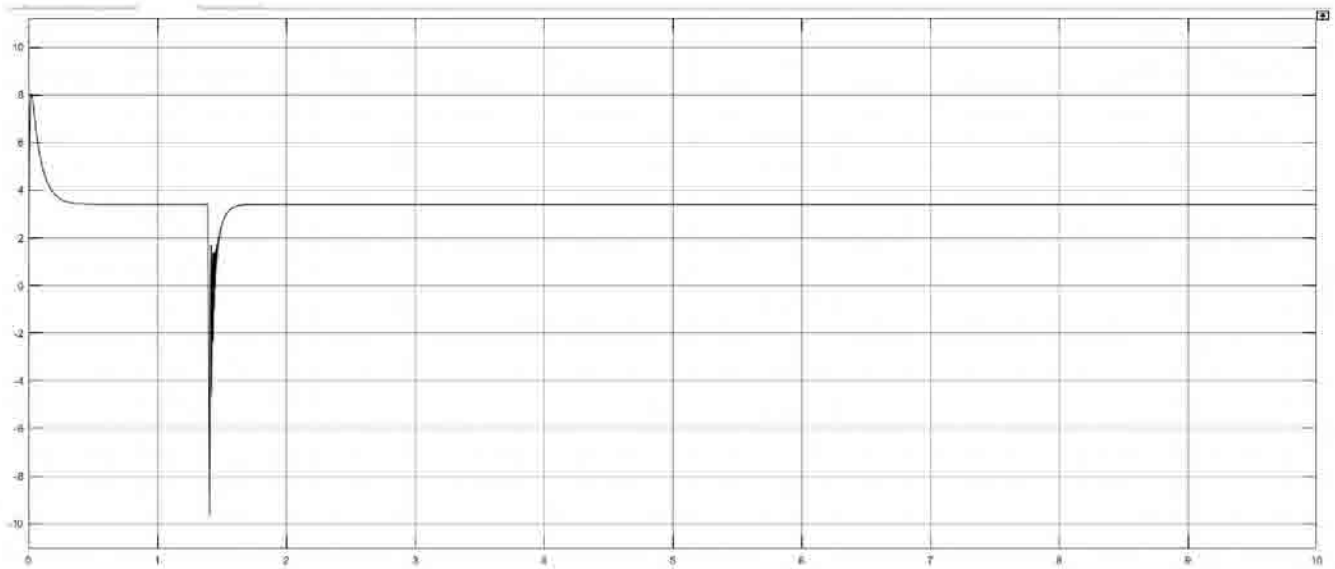


Рисунок 3.16 – ток обмотки якоря

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ

Лист

54

4 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННЫ

После создания математической модели можно приступит к созданию электрической схемы для системы автоматического управления антенны. На схеме должна быть реализована связь со всеми датчиками, выбранными выше, а также с двигателем.

Электрическую схему для управления антенной, условно, можно разделить на 4-ре части:

- Блок питания;
- Блок управления;
- Блок связи;
- Блок контроля–состояния схемы;

Блок питания, как понятно из названия, питает все оставшиеся блоки такими напряжениями как 3.3В, 5В, 15В, 300В.

В блок управления входят микроконтроллер и драйвера осуществляющие контроль, над силовыми ключами, а значит управление над двигателем.

Блок связи отвечает за, связь микроконтроллера с СЦВМ – 3, датчиками тока, скорости и угла, выбор которых описывался пред идущей главе.

Блок контроля–состояния схемы отвечает за обнаружение и устранения разного рода неисправностей с помощью аппаратной защиты.

4.1 Блок питания платы

Блок питания так же можно разделит на две части силовая и информационная. В силовой происходит выпрямление 3-х фазного напряжения 220 В 400 Гц. в переменной напряжение 300 В, для питания двигателем. А в информационной части происходит преобразование напряжение 27 В в 15, 5, 3.3В, для питания информационной части электрической схемы.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

4.1.1 Силовая часть блока питания

Для работы двигателя 5ДВМ115 А 6 3 Т2 О4 требуется чтобы к силовым транзисторам, которые управляют двигателем, подводилось напряжение в 300В постоянного тока. Для подобных целей в пусковой установке 9А83 происходит генерация трех фазного напряжения 220 В 400Гц для выпрямления этого напряжения мы будем использовать 2 диодных моста. GBJ2510-F, на схеме изображены как VD1 и VD2, после выпрямления напряжения у нас получается пульсирующее положительное напряжение, для сглаживания этих пульсаций в этой схеме применим Г-образный LC-фильтр, который кроме того, что уменьшает пульсации так он, из-за наличия индуктивности, сглаживает ток, который мог вывести из строя диодные мосты.

Индуктивность для LC фильтра определяется следующим образом

$$L = \frac{2 \cdot R_d}{(mn^2 - 1) \cdot mn \cdot \omega} \quad (4.1)$$

Где: mn – коэффициент показывающий во сколько раз частота основной гармоники выпрямленного напряжения больше частоты сети, $mn = 6$

ω – частота сети в рад/с $\omega = 2513.27$

$0R_d$ – сопротивление нагрузки определяется по формуле:

$$R_d = \frac{(\sqrt{2} \cdot U_{\text{сети}})^2}{U_{\text{ш}} \cdot I_{\text{ш}}} \quad (4.2)$$

Где $U_{\text{сети}}$ – Значение выпрямляемого переменного напряжения, =220 В

$U_{\text{ш}}$ – Напряжение питающей шины двигателя, = 300 В

$I_{\text{ш}}$ – Ток питающей шины двигателя, = 2 А

$$R_d = \frac{(\sqrt{2} \cdot 220)^2}{300 \cdot 2} = 161.333 \text{ Ом}$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Теперь найдем минимальное значение для нашего фильтра

$$L = \frac{2 \cdot 161.333}{(6^2 - 1) \cdot 6 \cdot 2513.27} = 6.113 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Теперь рассчитаем минимальную емкость конденсатора по формуле

$$C = \frac{1}{(0.1 \cdot m \cdot n \cdot w)^2 \cdot L} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{1}{(0.1 \cdot 6 \cdot 2513.27)^2 \cdot 6.113 \cdot 10^{-4}} = 7.19321 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$$

С учетом номенклатурных рядов выбираем силовой дроссель серии В82615 с индуктивностью = 0,7 мГн, а в качестве емкости используем два параллельно соединённых электролитических алюминиевых конденсатора ЕСАР (К50-35) на 680 мкФ, такое большое увеличение емкости происходит из-за того, что погрешность выбранных конденсаторов составляет 20%. Рисунок 4.1

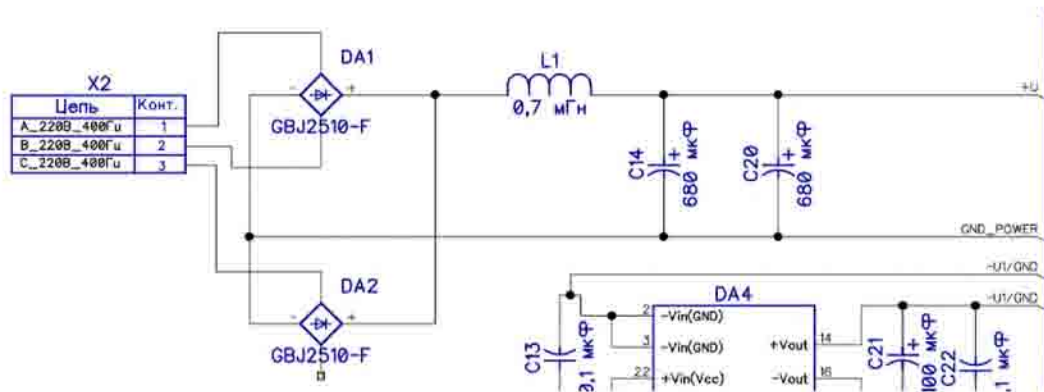


Рисунок 4.1 – Силовая часть блока питания

4.1.2 Информационная часть блока питания

Для преобразований постоянного напряжения одного уровня в напряжение другого уровня часто применяют импульсные преобразователи напряжения с использованием индуктивных накопителей энергии. Такие преобразователи

отличаются высоким КПД, иногда достигающим 95%, и обладают возможностью получения повышенного, пониженного или инвертированного выходного напряжения.

Импульсный стабилизатор напряжения представляет собой систему автоматического регулирования. Возможно два варианта регулирования выходного напряжения:

Путем управления продолжительностью импульсов и пауз между ними, что представляет собой принцип широтно-импульсной модуляции;

Путем сравнения выходящего напряжения с минимально и максимально допустимыми значениями. Если оно выше максимального, то накопитель перестает накапливать энергию и разряжается. Тогда на выводе напряжение становится меньше минимального. При этом накопитель снова начинает работать (принцип двухпозиционного управления).

В импульсных стабилизаторах силовой элемент работает в дискретном (ключевом) режиме. Таким образом, передача энергии от первичного источника в нагрузку происходит в виде импульсов. Свойство дросселей накапливать энергию за счёт магнитных полей у конденсаторов – накопленный электрический заряд, используется для сглаживания пульсаций выходного напряжения, обычно имеющего исходно форму прямоугольных импульсов.

Часто силовой элемент представлен импульсным DC/DC преобразователем, с помощью которого можно регулировать напряжение на нагрузке и даже получать отрицательное выходное напряжение, что невозможно при использовании обычных (линейных) регуляторов напряжения. Одна из наиболее перспективных областей применения таких преобразователей – создание распределённых систем электропитания, как в используемой электрической схеме рисунок 4.2

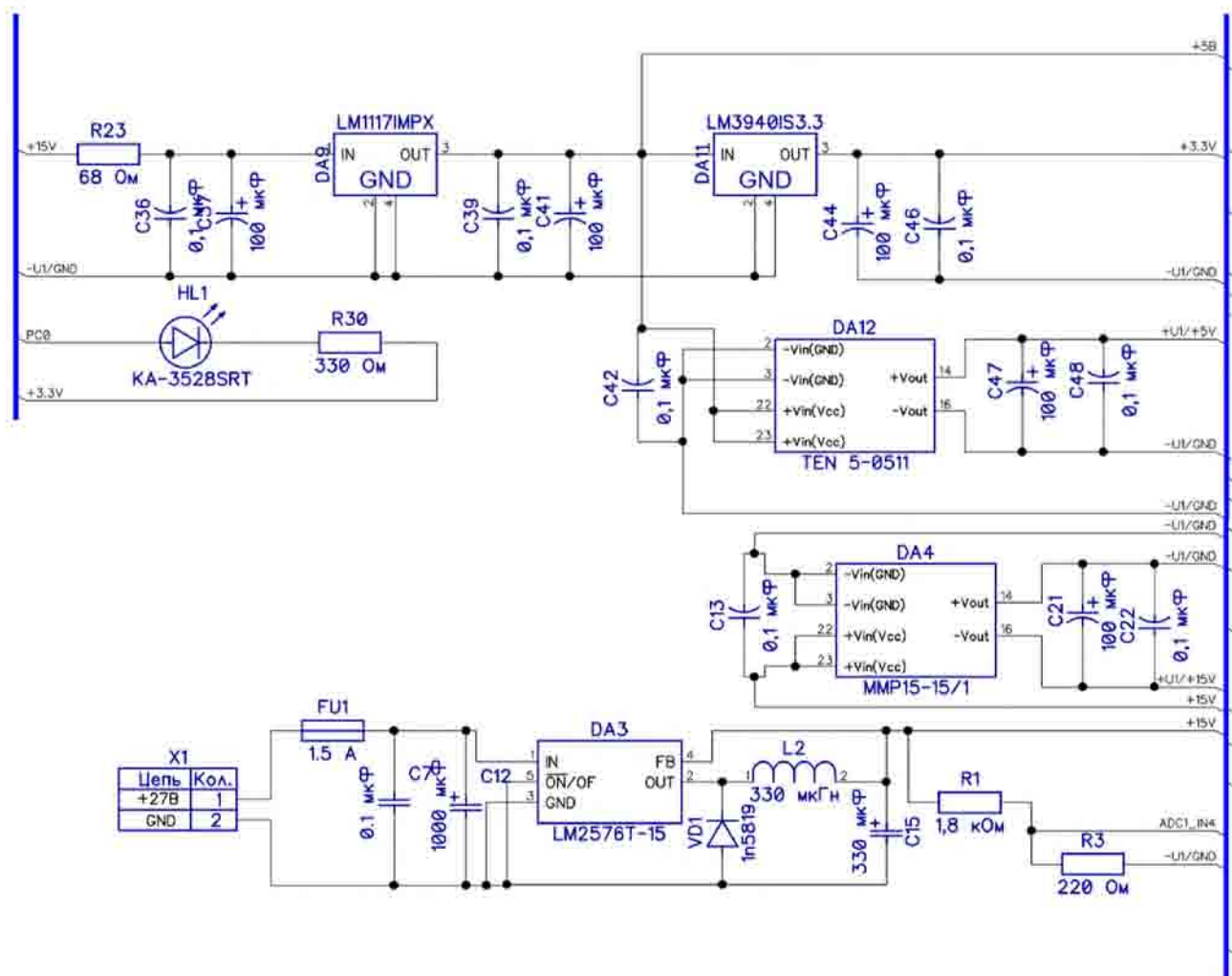


Рисунок 4.2 – Принципиальная электрическая схема блока питания

В схеме используется понижающий DC/DC преобразователь LM2576T-15, максимально допустимый ток для данной схемы составляет 3 ампера. Для обеспечения непрерывным снабжением тока в нагрузке, был выбран индуктивный накопитель L1. Снижение общих пульсаций достигается с помощью конденсатора C12 и C15. Диод VD2 является блокировочным. Он обеспечивает протекание тока через индуктивность при запертом выходном ключе. Для снижения потерь на диоде и устранения эффекта обратного восстановления был выбран диод Шоттки.

Импульсный стабилизатор напряжения является источником высокочастотных помех в связи с тем, что содержит ключи, коммутирующие ток. Поэтому в моменты коммутации возникают значительные броски напряжения и тока, порождающие противофазные и синфазные помехи как на входе, так и на

выходе стабилизатора. Поэтому фильтры для подавления помех устанавливаются как на входе, так и на выходе стабилизатора. Конденсаторы C12 и C15 являются электролитическими, используются для обеспечения устойчивости и стабильности схемы.

На выходе получаем +15 В, так же с помощью DC/DC преобразователя MMP15-15/1, получим те же +15 В только гальванически развязанные, это требуется для питания драйверов. [10]

С помощью линейного стабилизатора LM1117IMPX, которые выполняют роль регуляторов напряжения с низким током покоя и малым падением напряжения, полученные ранее +15 В преобразуем в +5 В. Максимально допустимый ток для данных преобразователей составляет 1,2 ампера. Так же полученные +5 В поступают на гальванически развязный DC/DC преобразователь TEN 5-0511, который из выдает гальванически развязанные +5 В, требуемые для питания драйверов.

Прецизионный регулятор напряжения LM3940IS3.3 преобразует из +5 в +3.3 В, допустимый ток составляет 1 ампер.

Таким образом, данный блок осуществляет питание остальных функциональных блоков, постоянным напряжениями в +3.3, +5, +15 и +300 В.

4.1.3 Блок управления платы

Основой блока управления является микроконтроллер широкого назначения STM32F303CBT6 который представлен на рисунке 10.

STM32F303CBT6 – тридцатидвухразрядный микроконтроллер, выполняющий цифровую обработку сигнала (DSP), данный контроллер способен работать с цифрами с плавающей точкой. Так же, данный микроконтроллер имеет четыре двенадцати разрядных АЦП и ЦАП, семь компараторов, пять шестнадцатиразрядных таймеров общего назначения и один тридцатидвухразрядный.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

На принципиальной схеме процессор обозначается как DD5. Питание микроконтроллера осуществляется 3 вольтами, проходящие дополнительное выравнивание напряжение. Конденсаторы C49, C50, C53, C55, C57 – C60 и L3 с R49 подключены к выводам питания микроконтроллера для выравнивания напряжения.

Так же, можно заметить кварцевый резонатор ZQ1, он установлен для обеспечения заданной стабильной тактовой частотой. Элементы C51, C52 являются составными элементами тактового генератора. Тактовый генератор — это своего рода сердце микроконтроллера. По каждому "тику" иначе говоря, импульсу тактового генератора происходит какая-либо операция – передаются данные по шинам и регистрам, работают таймеры, переключаются порты ввода/вывода. Соответственно, чем больше тактовая частота, тем больше энергии потребуется микроконтроллеру.

Так же для облегчения процесса отладки, предусмотрен светодиод, и тактовая кнопка сброса микропроцессора S1 (RESET).

Кнопка RESET используется в процессе разработки устройства для сброса микроконтроллера в начальное состояние. При отладке устройства очень полезно иметь возможность выполнения сброса, чтобы обеспечить повторный запуск микроконтроллера. При включении схемы конденсатор C34 разряжен и напряжение на выводе NRST близко к нулю – микроконтроллер не стартует. Но со временем конденсатор заряжается и напряжение на NRST достигнет логической единицы – микроконтроллер запускается. Кнопка S1 разряжает конденсатор и происходит перезапуск микроконтроллера. [18].

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

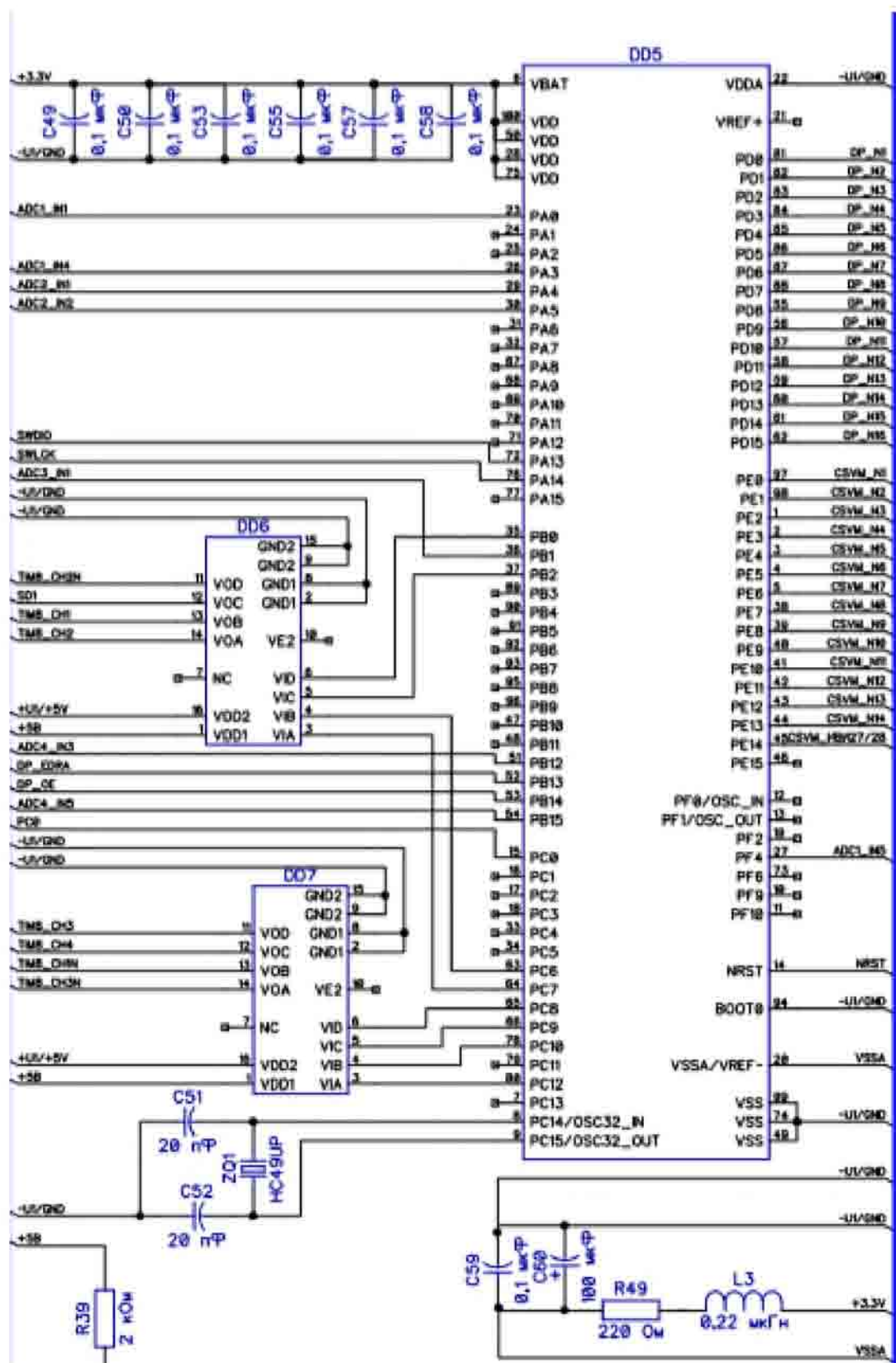


Рисунок 4.3 – Схема подключения микроконтроллера

С помощью программы STM32CubeMX, были выбраны ножки микроконтроллера для правильного написания кода и формирования нужных

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

сигналов, так, Порт D и PB13–14 используются для связи с датчиком положения, Порт E используется для связи с СЦВМ – 3. Порты PA0, PA3, PF4 используются 1-м и 4-м, 5-м каналом АЦП 1. Порты PA4, PA5 используются 1-м и 2-м каналами АЦП 2, PB1 используются 1-м каналом АЦП 3, PB12 и PB15 используются 3-м и 5-м каналами АЦП 4. Порты PC6 – PC10, PC12, PB0 используются таймером счетчиком 8, для управления драйверами, PC0 используется для индикации светодиода .[15]

Вывод WOOT0 микроконтроллера предназначен для управления загрузкой. Так как в нашем устройстве он не используется, он был деактивирован на землю.

По средствам связи, микропроцессор осуществляет управление над 3-мя драйверами IR25607 и драйвером IR2121PBF (см. рис. 4.4). Драйверы, предназначены для непосредственного управления затворами силовых транзисторов, тем самым они обслуживают стойки силового моста. По сути, они являются усилителями мощности и напряжения входного сигнала, а также в случае надобности обеспечить потенциальный сдвиг. Данные драйверы обеспечивают ток перезаряда емкости затвора 2 ампера. Соответственно, в стойках можно использовать транзисторы с током стока в 10-20 раз большим.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

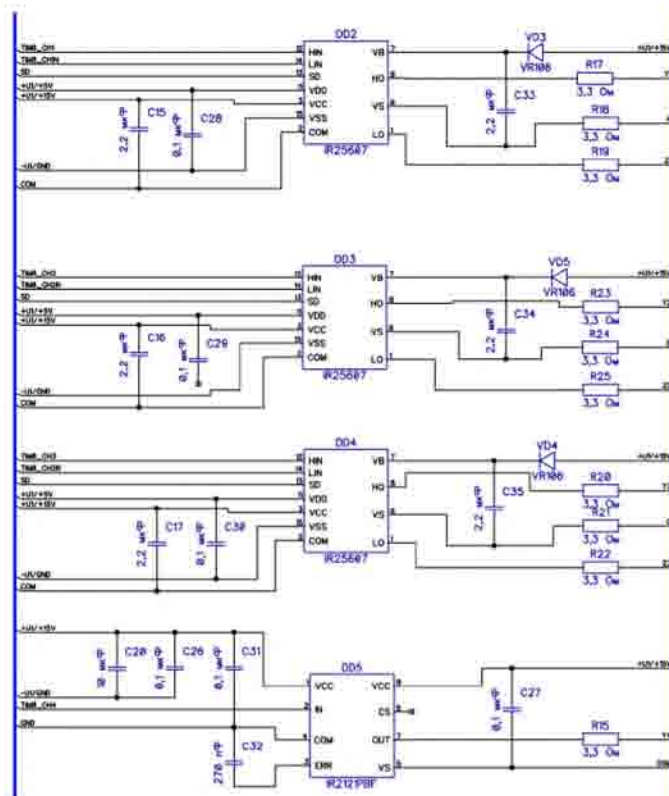


Рисунок 4.4 – Принципиальная электрическая схема подключения драйверов управляющих силовыми ключами

Так же стоит упомянуть, что драйверы потребляют энергию только во время переключения силовых ключей, соответственно на прецизионном регуляторе напряжения LM2576T-15 потери составляют не более 0,16 ватт.

Драйверы управляют весьма сложными преобразовательными элементами схемы, поэтому содержат большое количество логических элементов внутри, а также защит от тока короткого замыкания.

При выборе драйвера для транзисторов необходимо учитывать:

- 1) Закон управления
 - Драйверы верхнего и нижнего ключей подходят для симметричного закона
 - Драйверы верхнего и нижнего ключей с управлением каждого ключа независимо подходят для несимметричного закона.
- 2) Параметры транзистора токи стока или коллектора

– Драйвер с выходным током в 1 А может управлять ключами с током до 30 А

– Драйвер с выходным током в 2 А может управлять ключами с током до 80 А

Драйвер с выходным током в 3 А может управлять ключами с током до 150 А

В случае неправильного подбора драйвера, время включения и выключения транзистора значительно увеличивается, а значит ключ теряет свои основные достоинства.

3) Учёт дополнительных функций

Сейчас существует множество разных драйверов под разные задачи, поэтому следует учитывать:

- разные типы защиты ключа
- защиту от просадок напряжения питания
- имеет ли он встроенный бутстрепными диодами
- возможно ли регулирование времени задержки включения одного ключа по отношению к моменту включения второго.
- имеет ли данный драйвер гальваническую развязку, в случае её отсутствия, необходимо подключать высокочастотную диодную оптопару
- противофазные или синфазные
- питание драйверов осуществляется через бутстрепный вид или существует необходимость в гальванических развязках [11].

Для уменьшения амплитуды переходного процесса на шине постоянного тока, каждая стойка силового моста зашунтирована керамическим конденсатором.

Из-за особенности внутреннего строения драйвера, ему требуется разное напряжение питания, данный элемент состоит из двух отдельных схем в одном корпусе. На первую схему с блока питания поступает 12 вольт, однако драйверу

требуется питание и для второй схемы. Для определения питания второй микросхемы стоит рассчитать цепь зарядки бутстрепного конденсатора.

В представленной работе, составлена стандартная схема управления вентильным двигателем из 6-ти силовых ключей IRF740APBF VT2-VT7, смотри рисунок 4,7, верхнего и нижнего плеча. Они осуществляют переключение фаз таким образом, чтоб вектор магнитного поля статора был всегда перпендикулярен вектору магнитного поля ротора. Данные условия соответствуют максимальному значению момента с наименьшими пульсациями. Управляющий сигнал с драйверов поступает на затворы силовых ключей, после чего производится соответственное поочерёдное переключение.

С помощью широтно-импульсной модуляции, микроконтроллер управляет током протекающем через обмотки, т.е. вектором магнитного поля статора, таким образом регулируется момент, действующий на ротор, знак у угла определяет направление момента.

Поскольку номинальный ток вентильного двигателя составляет 3 ампера, то были выбраны ключи на максимально допустимые токи в 10 ампер, и напряжение в стоке и истоке 400 вольт. Данные параметры удовлетворяют требованиям выпускной квалификационной работы.

В итоге, блок управления платы осуществляет контроль над силовыми ключами, а значит контроль над исполнительным органом. Схема содержит в себе элементы, удовлетворяющие требованиям проекта и способна выдержать небольшие перегрузки в напряжении на обмотках двигателя. [9]

4.1.4 Блок связи и прошивки

Данный блок предназначен для взаимодействия платы с внешней специальной электронно-вычислительными машиной, датчиками скорости, положения и тока, и напряжения, а также для прошивки нового программного кода. Связь с СЦВМ – 3 происходит через вилку ВН-16, связь с датчиком положения

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

ротора происходит через вилку ВН-30, связь датчиками тока ACS712ELCTR-20A-Т происходит напрямую с помощью каналов АЦП микроконтроллера, связь с тахогенератором (датчиком скорости) происходит по средствам делителя напряжения с дальнейшей отправкой на АЦП, связь с датчиком напряжения осуществляется с помощью ОУ (DA 10) с дальнейшей отправкой сигнала на АЦП.

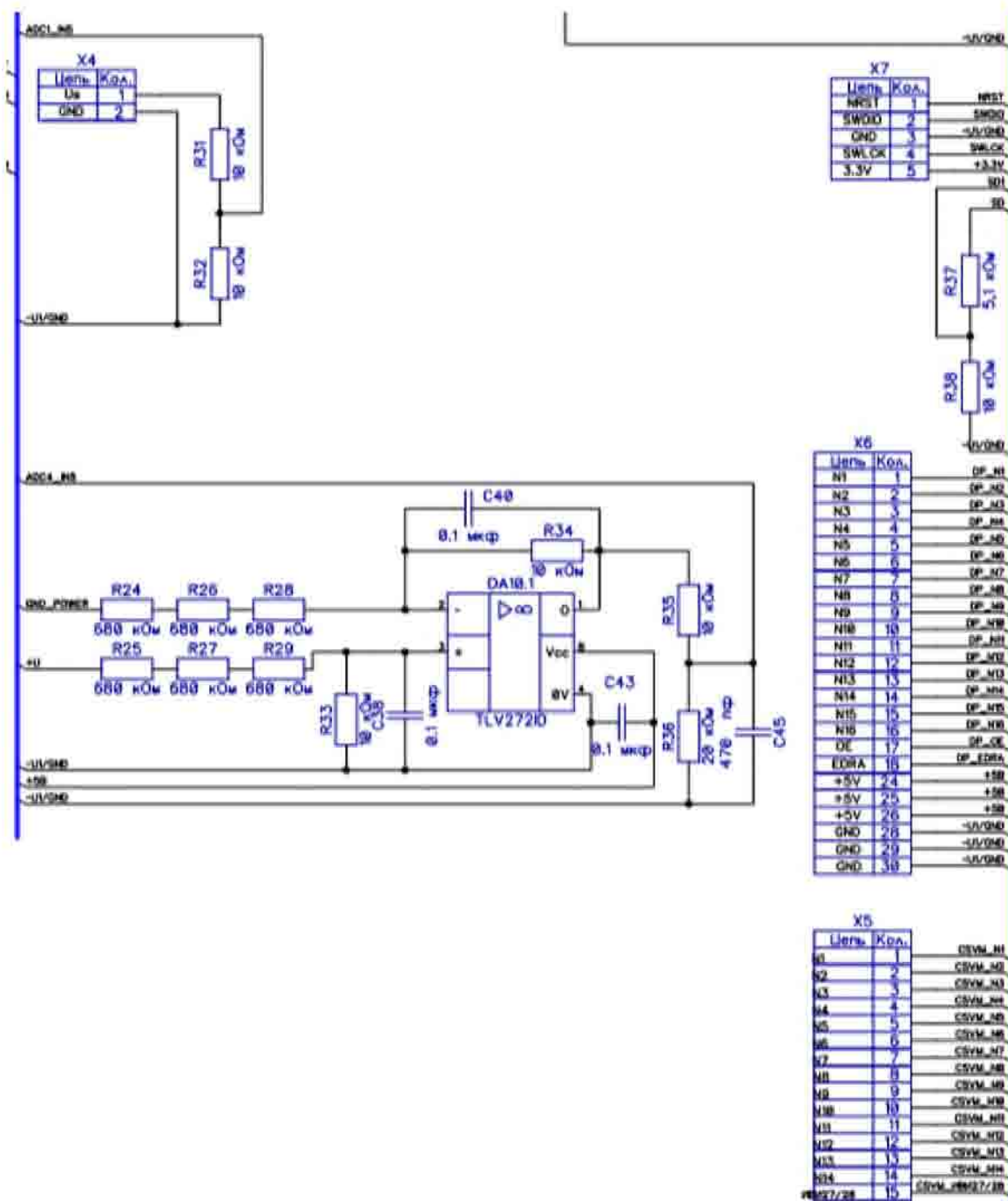


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема блока связи

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Для облегчения процесса отладки предусмотрен светодиод о которых LED1 для светодиодов выбираем схему подключения порт – земля. Для того чтобы зажечь светодиод, на соответствующий вывод, следует, подать высокий уровень напряжения (логическую единицу). Для того, чтобы ограничить ток, проходящий через светодиод, было подключено токоограничивающее последовательное сопротивление.

Для прошивки флэш-памяти процессора и отладки программного кода, инженеру необходимо иметь любую из оценочных плат с ARM-процессором и SWD-разъемом от фирмы ST Microelectronics, например, фирменный программатор с гальванической развязкой или STM32F3DISCOVERY. [12].

4.1.5 Блок контроля – состояния схемы

Блок контроля–состояния схемы отвечает за обнаружение и устранения разного рода неисправностей с помощью аппаратной защиты.

В каждой функциональной системе имеется система предупреждения или автоматического включения резервирования, в данной работе так же имеется система предупреждения о неисправности рабочего органа. Она осуществляется по средствам датчиков тока ACS712ELCTR-20A-T.

Микросхемы на основе датчиков тока играют большую роль в сохранении энергии. Этому способствует низкое питание и энергопотребление. В интегральных схемах происходит объединение всех необходимых электронных компонентов. Характеристики приборов значительно улучшаются, благодаря совместной работе сенсоров магнитного поля и всей остальной активной электроники.

Современные датчики тока способствуют дальнейшему уменьшению размеров, поскольку вся электроника интегрирована в единственный общий чип. Это привело к новым инновационным компактным дизайнерским решениям, в том

числе касающимся и первичной шины. Каждый новый датчик тока обладает повышенной изоляцией и успешно взаимодействует с другими видами электронных компонентов [9].

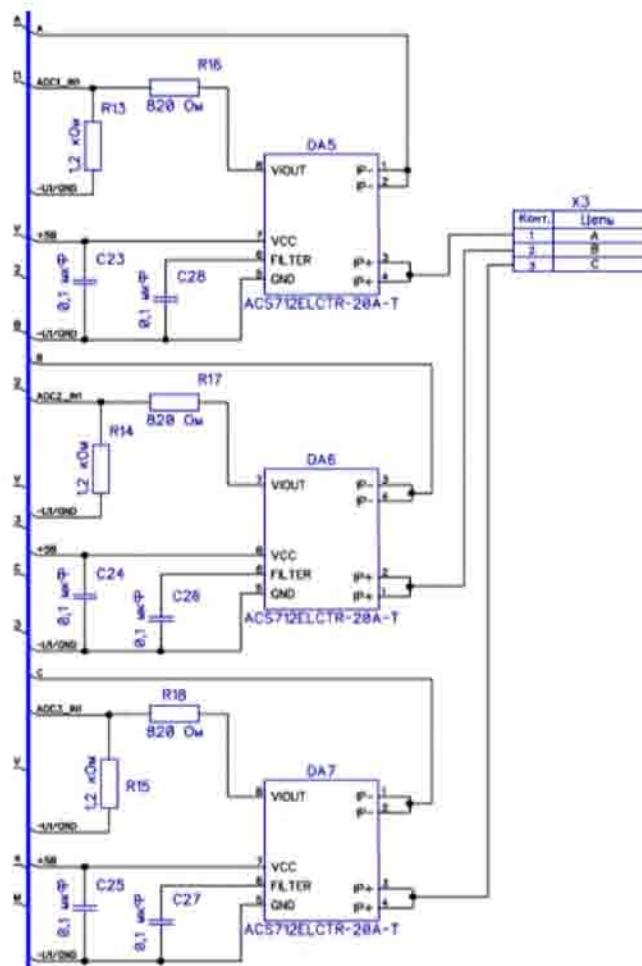


Рисунок 4.6 – Схема подключения датчиков тока

Была собрана схема из трех таких датчиков, которые снимают показатели тока с фазы А, В, С. Конденсаторы C23 – C25, C26–C28 установлены для стабильного питания схемы.

Кроме защиты по току для фаз двигателя, в это схеме, реализована тормозного резистора, который включается при активации ключа VT1, этот ключ управляется драйвером IR2121PBF, смотри рис 4.4.

А также на плате реализована аппаратная защита, которая отправляет на микроконтроллер сигнал, при превышении на силовой общей линии тока в 10 А.

реализуется это с помощью датчика тока DA5 и схемы компаратора собранной на ОУ DA13.1

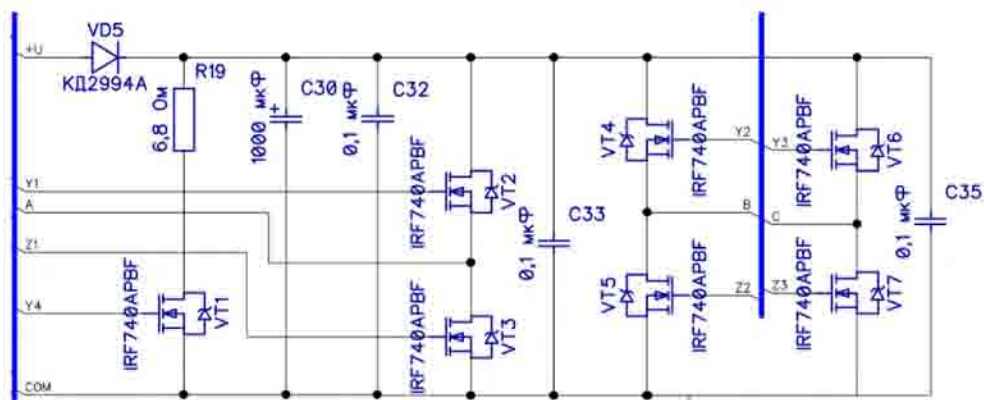


Рисунок 4.7 схема подключения транзисторов

Из-за, возможных, наводок в силовую землю для защиты остальной части схемы предусматривается гальваническая развязка. Гальваническая развязка — передача энергии или сигнала между электрическими цепями без электрического контакта между ними. Гальваническая развязка используются для передачи сигналов, бесконтактного управления и защиты оборудования.

Если гальваническая развязка не используется, то предельные токи, протекающие между цепями, ограничиваются только электрическими сопротивлениями. В результате возможно протекание огромных моментальных токов, которые могут повредить компоненты цепи. Прибор, обеспечивающий развязку, искусственно ограничивает передачу энергии из одной цепи в другую. В качестве такого прибора может использоваться разделительный трансформатор или оптрон. В обоих случаях цепи оказываются электрически разделёнными, но между ними возможна передача энергии или сигналов. В схеме происходит гальваническая развязка выходов микроконтроллеров, которые отправляют данные на драйвере, а также гальванически развязываются напряжения +15 и +5 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проектирования, была изучена научная литература как отечественных писателей, так и зарубежных, произведен анализ возможных вариантов модернизации и оптимизации, ныне существующей систем управления.

Были подобраны двигатель, датчик тока, положения и скорости. Также была разработана принципиальная электрическая схема платы управления СДПМ для привода антенны. Была разработана математическая модель системы автоматического управления согласно которой быстродействие системы выросло в 3 раза, бес потерь в точности.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

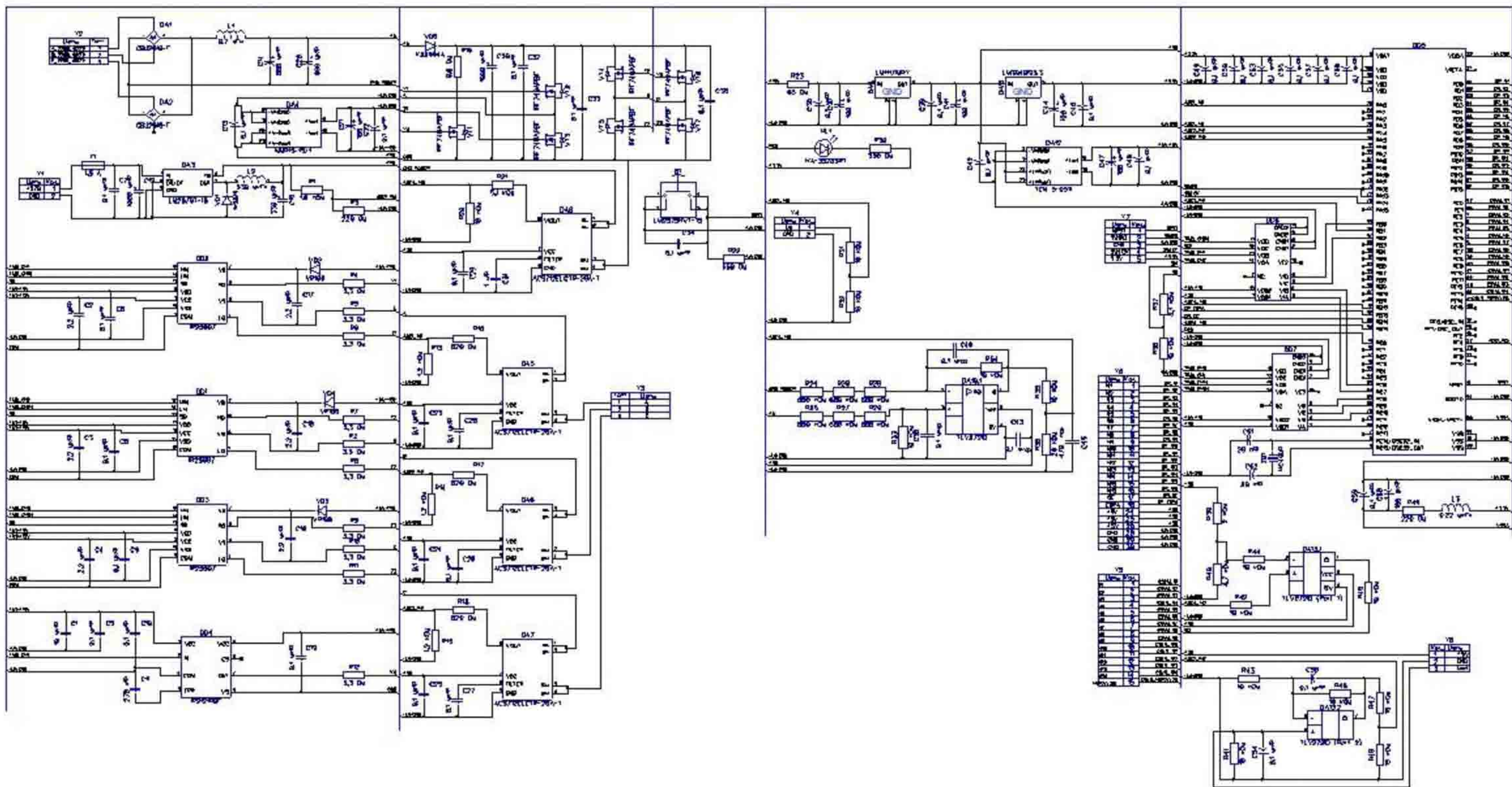
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. Часть 1 / С.Г. Воронин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 171 с.
- 2) Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. Часть 2 / С.Г. Воронин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 115 с.
- 3) Клиначев, Н.В. Настройка цифровых систем управления электропривода в картинках. / Н.В. Клиначев. – ЮУрГУ, 2017 – <http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/JS/fwlink.htm#D648>.
- 4) Полуянович Н.К. Силовая электроника/ Н.К. Полуянович Н.К. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 204с.
- 5) Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007 год, 288 стр., формат 17x24 см, мягкая обложка, ISBN 978-5-388-00020-0.
- 6) 9A83. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/9A83>
- 7) Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и головными частями) учебник для вузов / Г.Н. Разоренов, Э.А. Бахрамов, Ю.Ф. Титов; Под ред. Г.Н. Разоренова. ,2003. 584с.: ил
- 8) Математическая теория конструирования систем управления: Учеб. для вузов. /В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2003 – 614 с.ил.
- 9) Гейтеинко Е.Н. Источники вторичного электропитания схемотехника и расчёт/ Е.Н. Гейтеинко. – М.: Изд-во СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с. Япя
- 10) Мастер приведения параметров электрических машин. – http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_20131127.htm.
- 11) Динамические модели вентильного двигателя при различных сочетаниях параметров – <http://model.exponenta.ru/20120914.html#>.
- 12) C-300B. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/C-300B>.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

- 13) Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла –
<http://ru.avangard.org/content/files/ПФ-ДЭ-16-100.pdf>.
- 14) Datasheet STM32F303CBT6 –
http://www.datasheetlib.com/datasheet/328413/stm32f303cbt6_stmicroelectronics.html.
- 15) Николаенко М.Н. Самоучитель по радиоэлектронике/ М.Н. Николаенко. – М.: Изд-во NT Press, 2006. – 92 с
- 16) Профессор К.А. Основы электроники/ К.А. Профессор. – М.: Изд-во Государственное энергетическое издательство, 1946. – 320 с.
- 17) Общие сведения об операционных усилителях
http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/md_102.htmЯп

ПРИЛОЖЕНИЕ А



					ЮргУ-13 03 02.2018 166.03 '33		
Изм. №	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Плата управления СДПМ для привода антенны Схема электрическая принципиальная	Лист	Масштаб
РосФосФ.		Безопасное ИС				Лист 74	Листов 79
Грив		Шабуров ПО.				ЮргУ Летательные аппараты	
Т. комп.							
И. комп.		Шабуров ПО.					
Упр.		Дегтерев ВГ.					

Перед. примеч.

Средств. №

Подп. в авто.

Заказы или № зав. № докум.

Подп. в авто.

Лист № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примеч.
	<u>Установочные</u>		
B1	SWT-20-8	1	Кнопочный переключатель
	<u>Конденсаторы</u>		
C1	GRM31CR71A106KA01L	1	SMD 1206 X7R 10uF ±10%
C2..C4	GRM31MR71A225KA01L	3	SMD 1206 X7R 2.2uF ±10%
C5..C10	GRM31CR72E104K	6	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C11	GRM31CR72A104K	1	SMD 1206 X7R 470pF ±10%
C12	ECAP (K50-35), 1000 мкФ, 50 В	1	
C13	GRM31CR72E104K	1	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C14	ECAP (K50-35), 680 мкФ, 50 В	1	
C15	ECAP (K50-35), 330 мкФ, 50 В	1	
C16...C18	GRM31MR71A225KA01L	3	SMD 1206 X7R 2.2uF ±10%
C19	GRM31CR72E104K	1	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C20	ECAP (K50-35), 680 мкФ, 50 В	1	
C21	SR-16-100, 680 мкФ, 16 В	1	
C22...C29	GRM31CR72E104K	8	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C30	ECAP (K50-35), 1000 мкФ, 400 В	1	
C31	GRM319R71H103K	5	SMD 1206 X7R 0.001uF ±10%

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ ВКР		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Белоусов М.С.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Воронин С.Г.</i>				75	79
<i>Реценз.</i>					ЮУрГУ		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шабуров П.О.</i>			Летательные аппараты		
<i>Утверд.</i>		<i>Декабрь В.Г.</i>					

*Плата управления СДПМ для привода антенны
Перечень элементов*

Продолжение приложения Б

C32...C36	GRM31CR72E104K	5	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C37	SR-63-100, 100 мкФ, 63 В	1	
C38...C40	GRM31CR72E104K	3	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C41	SR-6.3-100, 100 мкФ, 6.3 В	1	SMD тант. А/В
C42...C43	GRM31CR72E104K	2	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C44	SR-16-100, 100 мкФ, 16 В	1	
C45	GRM31BR73A511K	1	SMD 1206 X7R 470 μF ±10%
C46	CC1206KRX7R9BB104	1	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C47	SR-16-100, 100 мкФ, 16 В	1	
C48..C50	GRM31CR72E104K	3	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C50...C51	GRM31BR73A511K	2	SMD 1206 X7R 20 μF ±10%
C53..C59	GRM31CR72E104K	7	SMD 1206 X7R 0.1uF ±10%
C60	SR-16-100, 100 мкФ, 16 В	1	
<u>Микросхемы</u>			
DA1...DA2	GBJ2510-F	2	KBJ6
DA3	LM2576T-15	1	NOPB
DA4	MMP15-15/1	4	DIP24
DA5...DA8	ACS712ELCTR-20A-T	4	
DA9	LM1117IMPX	1	SOT-223
DA10	TLV272ID	1	
DA11	LM3940IS3.3	1	NOPB
DA12	TEN 5-0511	1	DIP24
DA13	TLV272ID	1	
DD1...DD3	IR25607	3	SO16

Продолжение приложения Б

DD4	IR2121PBF	1	DIP8
DD5	STM32F303VCT	1	STM32F303VCT
DD6...DD7	ADUM1400	2	SO-16W
	<u>Предохранители</u>		
F1	RXEF150	1	1.5 A
	<u>Светодиод</u>		
HL1	KA-3528SRT		
	<u>Индуктивности</u>		
L1	B82615B2602M001	1	0.7 мГн, 6А,
L2	B82477G4334M	1	330 мкГн, 0.95 А
L3	LCN1206T-R22K-S	1	SMD 1206 X7R 0.22μГн ±10%
	<u>Резисторы</u>		
R1	RC1206JR-01,8KL	1	SMD 1206 1.8 Ом ±5%
R2	RC1206JR-03,3KL	1	SMD 1206 3.3 Ом ±5%
R3	RC1206JR-0220KL	1	SMD 1206 220 Ом ±5%
R4...R12	RC1206JR-03,3KL	9	SMD 1206 3.3 Ом ±5%
R13...R15	RC1206JR-01,2KL	3	SMD 1206 1.2 кОм ±5%
R16...R18	RC1206JR-0820KL	3	SMD 1206 820 Ом ±5%
R19	SQP-10W-6R8	1	10 Вт 6.8Ом
R20	RC1206JR-010KL	1	SMD 1206 10 кОм ±5%
R21	RC1206JR-05,1KL	1	SMD 1206 5,1 кОм ±5%

					ЮУрГУ – 13.03.02.2018.166.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

Продолжение приложения Б

R22	RC1206JR-0330KL	1	SMD 1206 330 Ом ±5%
R23	RC1206JR-068KL	1	SMD 1206 68 Ом ±5%
R24...R29	RC1206JR-0680KL	5	SMD 1206 680 Ом ±5%
R30	RC1206JR-0330KL	1	SMD 1206 330 Ом ±5%
R31..R35	RC1206JR-010KL	5	SMD 1206 10 кОм ±5%
R36	RC1206JR-020KL	1	SMD 1206 20 кОм ±5%
R37	RC1206JR-05.1KL	1	SMD 1206 5.1 кОм ±5%
R38	RC1206JR-010KL	1	SMD 1206 10 кОм ±5%
R39	RC1206JR-02KL	1	SMD 1206 2 кОм ±5%
R40	RC1206JR-04.7KL	1	SMD 1206 4.7 кОм ±5%
R41...R47	RC1206JR-010KL	7	SMD 1206 10 кОм ±5%
R48	RC1206JR-015KL	1	SMD 1206 15 кОм ±5%
R49	RC1206JR-0220KL	1	SMD 1206 220 Ом ±5%
<u>Приборы полупроводниковые</u>			
VD1	1n5819	1	Диод шотки
VD2...VD4	VR106	3	
VD5	КД2994А	1	
VT1...VT7	IRF740APBF	7	
<u>Соединители</u>			
X1	WF-2M	1	
X2..X3	EK950V-03P	2	
X4	WF-2M	1	
X5	BH-16 (DS1013-16S)	1	

Продолжение приложения Б

X6	BH-30 (DS1013-30S)	1	
X7	WF-5M	1	
X8	WF-3M	1	