

Министерство образования науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно - Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____/В.Г. Дегтярь/
_____/2018 г.

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА РУЛЕВОЙ МАШИНЫ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ ВКР

Руководитель проекта, (доктор
технических наук, профессор)
_____/С.Г. Воронин/
_____/2018г.

Федорченко Александр Сергеевич
студент группы П-428

_____/2018г.

Нормоконтролер (кандидат
технических наук, доцент)
_____/П.О. Шабуров/
_____/2018г.

Министерство образования науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно - Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____/В.Г. Дегтярь/

2018 г.

З А Д А Н И Е

На выпускную квалификационную работу студента
Федорченко Александра Сергеевича
Группа П - 428

1. Тема работы:

Разработка схемы электрической электропривода рулевой машины

Утверждена приказом по университету от _____ 2018 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы _____ 2018 г.

3. Исходные данные к работе:

Стенд поворота сопла ракеты, данные напряжения бортовой сети, 27 В; параметры исполнительного органа число фаз 3, частота вращения при номинальном режиме 955 об/мин, мощность номинальная 3,82 кВт.

4. Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению / разработке:
Общие сведения о принципах и устройстве управления положением космических объектов в инерциальном пространстве;
Выбор абсолютного энкодера;
Выбор необходимых радиоэлементов;
Рассчитать необходимые номиналы радиоэлементов;
Разработка принципиальной электрической схемы платы управления электроприводом сопла ракеты;
Предоставить готовый вид печатной платы.

5. Иллюстративный материал:
Презентация PowerPoint

6. Дата выдачи задания _____

Руководитель _____ С.Г. Воронин
(подпись)

Задание принял к исполнению _____ А.С. Федорченко
(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка руководителя о выполнении
Обзор литературы по теме исследования	07.02.18 – 14.02.18	
Изучение структурной схемы исследуемой системы	15.02.18 – 23.02.18	
Выбор абсолютного энкодера	24.02.18 – 01.03.18	
Выбор элементной базы и расчет необходимых номиналов радиоэлементов	02.03.18 – 26.03.18	
Составление принципиальной электрической схемы	27.04.18 – 17.05.18	
Оформление пояснительной записки	18.05.18 – 14.06.18	
Составление презентации	15.06.18 – 20.06.18	

Заведующий кафедрой _____ /В.Г. Дегтярь _____ /
 (подпись)

Руководитель работы _____ /С.Г. Воронин _____ /
 (подпись)

Студент _____ /А.С. Федорченко _____ /
 (подпись)

АННОТАЦИЯ

Федорченко А.С. Разработка схемы электрической электропривода рулевой машины – Челябинск: ЮУрГУ, П-428, 82 стр., 30 илл., библиогр. список – 18 наим.

Цель – использование микропроцессорной техники для оптимизации рулевого управления сопла ракеты за счёт смены аналоговой системы управления на цифровую.

Задачи – изучить отечественную и зарубежную литературу по данному вопросу, разработать плату управления сопла ракеты, а также провести соответствующие расчеты номиналов радиоэлементов с приведенным экономическим расчётом.

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

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Федорченко А.С.			Разработка схемы электрической электропривода рулевой машины	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Воронин С.Г.					2	82
<i>Н. Контр.</i>		Шабуров П.О.				ЮУрГУ кафедра ЛА		
<i>Утверд.</i>		Дегтярь В.Г.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПРИНЦИПЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНЕРЦИАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	8
1.1 Устройства управления положением.....	8
1.1.1 Реактивные двигатели.....	9
1.1.2 Двигатели-маховики.....	10
1.1.3 Силовые гироскопические устройства.....	12
1.2 Виды механических передач	13
1.2.1 Зубчатые передачи.....	14
1.2.2 Червячные передачи.....	14
1.2.3 Планетарные передачи.....	16
1.2.4 Волновые механические передачи.....	17
1.2.5 Фрикционные передачи	18
1.2.6 Передача винт-гайка (шариковая передача).....	18
1.3 Рулевые машины принципы и требования.....	20
1.3.1 Гидравлические рулевые машины	20
1.3.2 Электрогидравлические рулевые машины	22
1.3.3 Электрические рулевые машины	24
1.3.4 Требования к динамике рулевого привода как исполнительного элемента системы стабилизации	28
1.3.5 Заключение.....	31
2 ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТА ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СОПЛА РАКЕТЫ	32
2.1 Описание работы платы	33
2.1.1 Блок питания платы.....	34
2.1.2 Блок управления платы.....	37
2.1.3 Блок связи и прошивки	42

2.1.4	Блок контроля на наличие неисправностей	44
2.2	Выбор абсолютного энкодера.....	47
2.2.1	Принцип действия преобразователей.....	51
2.2.2	Основные характеристики	52
2.2.3	Типы выходных сигналов и рекомендуемые схемы подключения	53
2.2.4	Способы выдачи данных.....	55
2.2.5	Характеристики выбранного абсолютного энкодера.	57
3	РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ	59
3.1	Расчёт DC/DC преобразователя.....	59
3.2	Расчёт питания драйверов.....	63
3.3	Расчёт номиналов силовых ключей	64
3.3.1	Расчёт теплового режима силовых ключей	68
3.4	Расчёт токоограничивающих резисторов для светодиодов	70
3.5	Расчёт стоимости одной платы.....	71
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	75
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	78

ВВЕДЕНИЕ

В двадцать первом веке всё чаще и чаще начинают задумываться об оптимизации каких-либо технологических процессов, вычислительной техники и иных, нужных человечеству приборов и механизмов. Придумать что-то действительно новое порой кажется трудной задачей, однако, людям стоит обращать внимание на то, что уже было сделано, и заставить это работать по-новому. С развитием микропроцессорной техники, многие механизмы и вычислительные машины были заменены и улучшены, но многое еще осталось неизменным. Этот вопрос остается актуальным и для авиационной техники.

Микропроцессорная техника сейчас активно вошла в нашу жизнь. Универсальность, гибкость, простота проектирования аппаратуры, практически неограниченные возможности по усложнению алгоритмов обработки информации – все это обещает микропроцессорной технике большое будущее. Микропроцессоры используются как в бытовых приборах для простейшей обработки сигналов и формирования команд, так и в сложнейших измерительных системах для цифровой обработки сигналов.

Для того чтобы преодолеть земное притяжение, ракете необходим большой запас топлива, при этом, чем больше топлива загружено, тем большее расстояние можно преодолеть, однако масса ракеты существенно увеличивается. Поэтому данный вопрос является решающим при создании ракет и остальных летательных аппаратов.

Целью выпускной квалификационной работы, является оптимизация рулевого управления электропривода сопла ракеты за счёт смены аналоговой системы управления на цифровую, которая позволит достичь снижения массогабаритных размеров, затрачиваемых на систему управления в корпусе ракеты. Данное техническое решение позволит использовать разработанную плату в широком спектре модельного ряда ракетостроения.

В соответствии с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

Аналитические задачи

1 Изучить научную литературу, объясняющую принципы и устройство управления положением космических объектов в инерциальном пространстве, принципы создания умных электрических цепей и создания плат, основы силовой электроники, а также устройство абсолютных энкодеров.

2 Провести анализ возможных вариантов модернизации и оптимизации ныне существующей системы управления поворотом сопла ракеты.

Проектные задачи

1 Рассчитать необходимые номиналы элементов платы управления исполнительным органом поворота сопла ракеты.

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

3 Продемонстрировать готовую печатную плату схемы управления исполнительным органом поворота сопла ракеты.

4 Произвести экономический расчет и предоставить оценочную стоимость реализации данной работы.

Предмет исследования – силовая электроника.

Объект исследования – плата управления исполнительным органом поворота сопла ракеты.

Степень разработанности в литературе – при создании системы управления летательными аппаратами, вопрос уменьшения массогабаритных размеров ставился неоднократно и всегда являлся решающим при проектировании готового решения управления исполнительным органом поворота сопла или других элементов ракеты. 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 механизма управления поворотом сопла ракеты, за счёт перехода от аналоговой техники к микропроцессорной, данный подход, позволит взглянуть на работу

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

механизма управления по-новому. Представленное техническое решение позволит использовать разработанную плату в широком диапазоне задач, поскольку появляется возможность с лёгкостью менять управляющую программу в соответствии с поставленной целью. А также, станет возможным серийное производство данного управляющего элемента.

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 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 ПРИНЦИПЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНЕРЦИАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Для ориентации и стабилизации КЛА в качестве управляющих устройств, применяются двигательные установки, создающие управляющие внешние и внутренние моменты относительно соответствующих осей аппарата. К таким установкам относятся малогабаритные реактивные двигатели, двигатели-маховики и силовые гироскопические устройства.

Реактивные двигатели создают управляющий момент за счет реакции струи газов, истекающих из сопла, ось которого располагается на некотором удалении (плече) относительно центра масс КЛА. Для получения возможно большего момента сопла располагаются либо на поверхности КЛА, либо выносятся на специальных штангах за его пределы.

Двигатели-маховики и силовые гироскопические устройства создают управляющий момент за счет изменения момента количества движения маховиков или гироскопов, вращающихся внутри КЛА. Применение подобных управляющих устройств возможно лишь в условиях космического полета.

Таким образом, управляющие устройства, использующие реактивные двигатели создают внешний момент. Двигатели-маховики и гироскопические устройства создают внутренний момент.[12]

1.1 Устройства управления положением

При движении космического летательного аппарата (КЛА) как твёрдого тела различают поступательное движение — движение центра масс аппарата относительно Земли — и вращательное движение — вращение аппарата вокруг его центра масс. Для того что бы космический летательный аппарат не терял ориентации в пространстве существуют специальные системы и устройства его положением с помощью которых осуществляется управление и контроль положением космического летательного аппарата [1].

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.1.1 Реактивные двигатели

Для управления вращательными движениями КЛА применяются специальные малогабаритные двигательные установки сравнительно малой тяги. Они получили название двигателей ориентации. Эти двигатели принято делить на три группы:

- жидкостно-реактивные двигатели обычного типа;
- однокомпонентные двигатели;
- струйные (газовые) сопла.

Двигатели первой группы применяются на тяжелых КЛА, когда требуется тяга свыше 50 кгс. Одновременно эти двигатели могут применяться для точного координированного управления движением центра масс на конечном участке сближения (причаливании) двух КЛА или для обеспечения мягкой посадки на поверхность Луны. Для повышения надежности система обычно содержит большее количество двигателей, чем это необходимо.

Основным достоинством жидкостно-реактивных двигательных установок является большой удельный импульс (удельная тяга), который представляет собой отношение тяги к секунднему весовому расходу топлива (рабочего тела). В результате для получения тяги определенной величины расход топлива ЖРД должен быть меньше, чем у двигателей второй и третьей групп.

Недостатком является сравнительно большая масса и сложность конструкции, что делает их неконкурентоспособными с двигателями второй и третьей групп.

Однокомпонентные двигатели создают тягу путем разложения химических соединений в камере с катализатором. Реакция протекает со значительным выделением тепла, и образующийся при этом газ, истекая через сопло, создает тягу. В качестве рабочего тела в двигателях подобного типа нашли применение перекись водорода (H_2O_2) и гидразин (N_2H_4).

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Двигательные установки третьей группы наиболее просты по устройству. Сжатый газ из баллона попадает в редукционную камеру, где его давление снижается до рабочего, и затем выходит через сопло, создавая тягу.

В качестве рабочего тела могут использоваться водород, гелий, метан, азот и воздух. Водород и гелий дают наибольшие значения удельных импульсов, приближающиеся к удельным импульсам однокомпонентных двигателей. Однако в связи с малым молекулярным весом они требуют больших баллонов для хранения. Двигательные установки на метане, азоте и воздухе более предпочтительны. Их весовые характеристики примерно равнозначны. Воздух является самым дешевым и обеспечивает наименьшую массу двигательной установки.

В данной работе будут рассматриваться газовые рули, а именно жидкостно-реактивные двигатели обычного типа.

1.1.2 Двигатели-маховики

В настоящее время достаточно широко применяются управляющие устройства, использующие маховики. Для привода маховиков наиболее приемлемы в условиях космического полета электрические двигатели как с точки зрения возможности получения первичной энергии, так и в отношении удобства управления.

Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к любому устройству для КЛА (высокая надежность, долговечность, малая масса и габариты, малое потребление энергии), основным требованием, предъявляемым к двигателю, приводящему маховик, является хорошая регулировочная характеристика в широком диапазоне скоростей. Рассмотрим с этих позиций различные электрические двигатели.

Наиболее распространенный в обычных условиях асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором обладает плохими регулировочными свойствами.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Управление скоростью около нулевого значения или в диапазоне малых скоростей сопровождается чрезмерным перегревом.

Наиболее подходящим с точки зрения регулировочной характеристики является двухфазный асинхронный двигатель. Регулирование частоты вращения такого двигателя осуществляется изменением напряжения в обмотке управления, что позволяет плавно изменять скорость вращения от нуля до максимальной. Основным достоинством двухфазного асинхронного двигателя является возможность обеспечения постоянства электромагнитного момента в широком диапазоне изменения скорости вращения. Его моментная характеристика близка к линейной по меньшей мере на 80% ее диапазона. Коэффициент полезного действия при максимальной выходной мощности составляет около 30%.

Единственный недостаток такого двигателя состоит в том, что его обмотка возбуждения питается непрерывно. Уменьшение мощности холостого хода возможно соответствующим перераспределением мощностей обмоток возбуждения и управления.

В качестве исполнительных устройств систем автоматического управления в настоящее время широкое распространение получили двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Это объясняется хорошо известными преимуществами двигателей постоянного тока (небольшие потери мощности, малые масса и габариты). Для привода маховиков применяются двигатели с постоянными магнитами, поток возбуждения которых можно считать величиной постоянной.

Наличие щеточно-коллекторного узла у двигателей постоянного тока обычного исполнения ограничивает длительность применения последних. Успехи в разработке интегральных схем и усовершенствование конструкции датчиков положения ротора позволили создать высокоэффективные бесщеточные двигатели постоянного тока. Эти двигатели обладают следующими преимуществами по сравнению с двигателями переменного тока при использовании для привода маховиков:

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

- высокий к. п. д. (свыше 90% для самого двигателя и свыше 75% для всей системы, включая обеспечивающую электронику);
- почти нулевые потери мощности в режиме холостого хода;
- высокая надежность, большие возможности по резервированию и длительный срок службы.

Кроме того, величина момента как при разгоне, так и при торможении маховика практически не зависит от скорости. Рабочая характеристика бесщеточного двигателя очень близка к линейной во всем диапазоне угловых скоростей.

Считается, что в некоторых случаях роль гиромаховика может играть часть КЛА, в которой размещается оборудование, не требующее определенной ориентации. Такие КЛА называются аппаратами с двойным вращением.

1.1.3 Силовые гироскопические устройства

Для создания внутренних управляющих моментов в системе управления КЛА могут применяться также гироскопические устройства. Независимые моменты по каждой связанной оси может создавать устройство, состоящее из трех спаренных двухстепенных гироскопов. В исходном положении кинетические моменты гироскопов направлены в противоположные стороны перпендикулярно оси управления, и их сумма равна нулю. При поступлении сигнала от системы управления моментный двигатель поворачивает гироскопы на равные углы. В результате по оси управления возникает кинетический момент.

Для создания управляющих моментов по трем осям с помощью таких устройств потребуется шесть двухстепенных гироскопов. Вместо этого могут использоваться три трехстепенных гироскопа. Система при этом обладает избыточностью, так как полный отказ одного из гироскопов не приводит к выходу из строя управляющего устройства в целом, а лишь несколько снижает его возможности по величине создаваемых управляющих моментов.

Достаточно перспективным устройством является шаровой маховик, создающий управляющие моменты относительно трех осей. Вся система представляет собой асинхронный двигатель с тремя статорными обмотками, расположенными по внутренней поверхности сферического корпуса в трех ортогональных плоскостях, и ротором (маховиком) в виде полого шара из электропроводящего материала. Для предохранения от соприкосновения со статорными обмотками (моментными катушками) шар удерживается внутри сферического корпуса в свободно подвешенном состоянии, что не вызывает больших затрат мощности в условиях полной и частичной невесомости. Данная подвеска может быть выполнена с помощью газовых подшипников, неоднородного высокочастотного магнитного или электрического поля.

Шаровой маховик обладает рядом достоинств по сравнению с обычными маховиками, установленными по трем осям: позволяет управлять угловыми движениями аппарата вокруг трех осей одновременно, гироскопически не связан с корпусом, отсутствие подшипников повышает надежность конструкции.

1.2 Виды механических передач

Механической передачей называют устройство для передачи механического движения от двигателя к исполнительным органам машины. Может осуществляться с изменением значения и направления скорости движения, с преобразованием вида движения. Необходимость применения таких устройств обусловлена нецелесообразностью, а иногда и невозможностью непосредственного соединения рабочего органа машины с валом двигателя. Механизмы вращательного движения позволяют осуществить непрерывное и равномерное движение с наименьшими потерями энергии на преодоление трения и наименьшими инерционными нагрузками.

Механические передачи вращательного движения делятся:

- по способу передачи движения от ведущего звена к ведомому на передачи трением (фрикционные, ременные) и зацеплением (цепные, зубчатые, червячные);

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

- по соотношению скоростей ведущего и ведомого звеньев на замедляющие (редукторы) и ускоряющие (мультипликаторы);
- по взаимному расположению осей ведущего и ведомого валов на передачи с параллельными, пресекающимися и перекрещивающимися осями валов.

1.2.1 Зубчатые передачи

Зубчатая передача – это трехзвенный механизм, в котором два подвижных звена могут являться либо зубчатыми колесами, либо колесом и рейкой с зубьями, которые образуют с неподвижным звеном вращательную либо поступательную пару.

Преимущества зубчатых передач:

- постоянное значение передаточного числа (звенья не проскальзывают);
- компактность (по сравнению с ременными и фрикционными передачами);
- высокий КПД (в одной ступени может достигать до 98%);
- надежность и долговечность в работе (для редукторов общего применения может быть установлен ресурс, равный 30 000 ч);
- возможность их применения в широком диапазоне мощностей (до десятков тысяч кВт) и скоростей (до 150 м/с).

Недостатки зубчатых передач:

- шум при работе на высоких скоростях;
- невозможность плавного изменения передаточного числа;
- высокие требования точности изготовления, сборки и монтажа;
- незащищенность от возможных перегрузок;
- наличие вибраций, возникающих в результате недостаточно точного изготовления и (или) неточной сборки передач.

1.2.2 Червячные передачи

Червячная передача применяется для передачи вращения от одного вала к другому, когда оси валов перекрещиваются. Угол перекрещивания в большинстве

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

случаев равен 90° . Наиболее распространенная червячная передача (рисунок 1) состоит из так называемого архимедова червяка, т.е. винта, имеющего трапецеидальную резьбу с углом профиля в осевом сечении, равным двойному углу зацепления ($2\alpha = 40$), и червячного колеса [4].

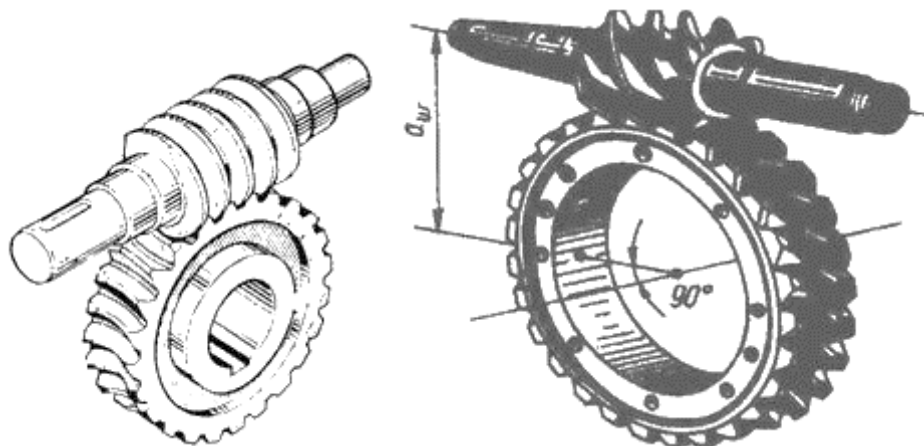


Рисунок 1 – Червячная передача

Червяки различают по следующим признакам: по форме поверхности, на которой образуется резьба, – цилиндрические (см. рис. 2, а) и глобоидные (см. рис. 2, б);

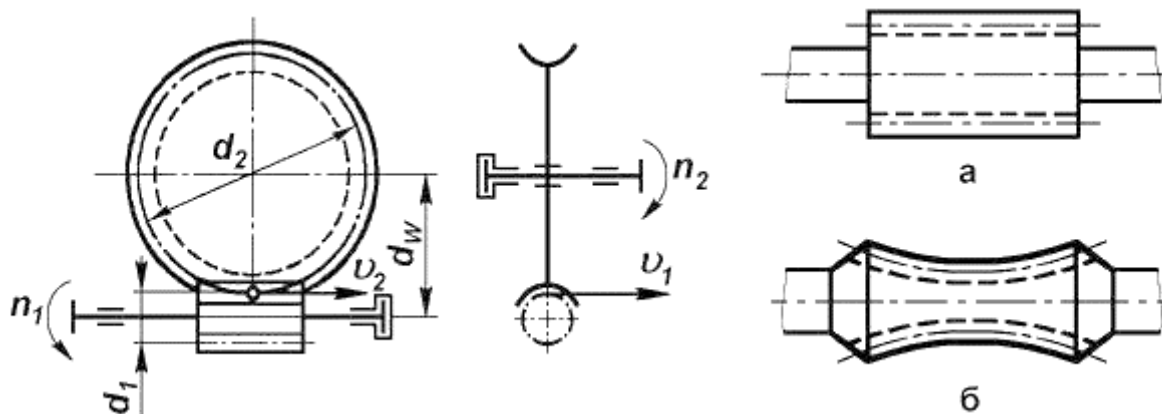


Рисунок 2 – Виды червяков

Наибольшее применение в машиностроении находят архимедовы червяки, так как технология их производства проста и наиболее отработана.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1.2.3 Планетарные передачи

Это передачи, которые содержат зубчатые колеса с перемещающимися осями (см. рисунок 3). Передача состоит из центрального колеса 1 с наружными зубьями, сателлитов 2, наружного колеса 3 с внутренними зубьями и водила Н. Сателлиты вращаются вокруг собственных осей и в то же время перемещаются вместе с осью вокруг центральной оси, т.е. они совершают движение, аналогичное движению планет.

Преимущества планетарных передач:

- нагрузка передается одновременно через несколько сателлитов, что уменьшает силы, действующие на зубья колес, следовательно, позволяет использовать шестерни меньших диаметров и масс;
- в планетарных передачах рационально используются колеса внутреннего зацепления, которые обладают большей нагрузочной способностью (по сравнению с колесами наружного зацепления);
- равномерное распределение сателлитов по окружности уравнивает радиальные силы, которые действуют на колеса, и к разгрузке подшипников центральных колес и водила;

планетарный механизм легко позволяет осуществить компактную конструкцию соосного редуктора (редуктора, оси ведущего и ведомого валов которого совпадают).

К недостаткам планетарных передач относятся повышенные требования к точности изготовления и монтажа [5].

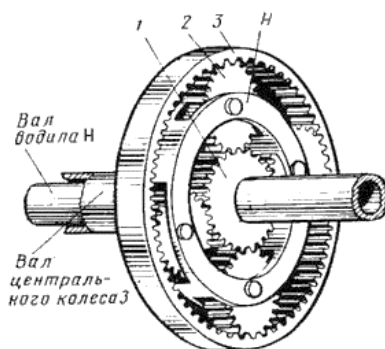


Рисунок 3 – Планетарный механизм

1.2.4 Волновые механические передачи

Работа данной передачи основана на принципе волнового деформирования гибкого звена механизма. Волновые зубчатые передачи (см. рисунок 4) являются разновидностью выше упомянутых планетарных передач, одно из колес которых гибкое.

Гибкое зубчатое колесо представляет собой цилиндр, у которого одна сторона соединена с валом и сохраняет цилиндрическую форму, а другая имеет зубья. Генератор волн предназначен для деформирования гибкого зубчатого колеса, заставляя его входить в зацепление с внешним цилиндром в нескольких местах. За 1 оборот генератора волн внутренний цилиндр смещается на определенный угол, который определяется соотношением количества зубьев на внутренне и внешнем цилиндре.

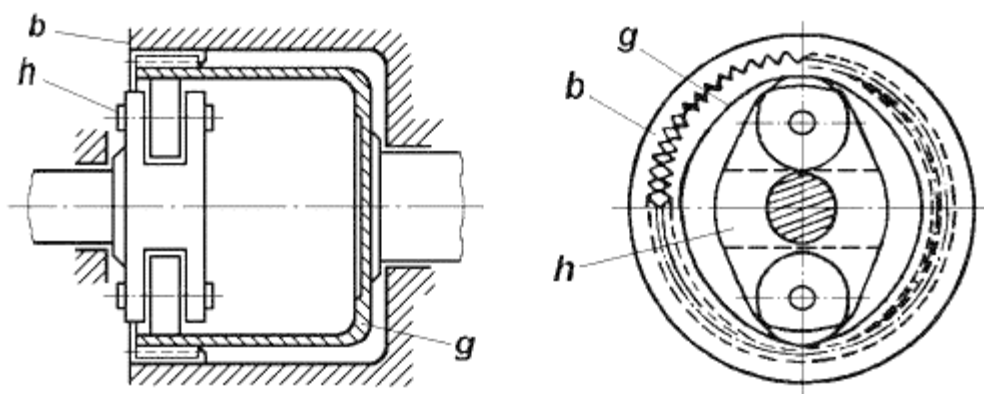


Рисунок 4 – Волновая зубчатая передача

Достоинства волновых передач по сравнению с зубчатыми передачами:

- меньшие масса и габариты;
- большая кинематическую точность;
- высокую способность к демпфированию;
- большие передаточные отношения в одной ступени (50...300);
- герметичность конструкции.

Недостатки:

- сложность конструкции и изготовления;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- небольшая скорость вращения ведущего вала генератора волн при больших диаметрах колес;
- повышенные потери на трение и на деформацию гибкого цилиндра (КПД составляет 0,7-0,85).

Волновые передачи применяются в приводах для передачи движения в герметизированное пространство в атомной, химической и космической технике; в кинематических и силовых приводах общего назначения с большим передаточным отношением; в исполнительных быстродействующих механизмах систем автоматического регулирования и управления; в механизмах отсчетных устройств, обладающих повышенной кинематической точностью [6].

1.2.5 Фрикционные передачи

Работа данных передач основана на использовании сил трения, которые возникают между двумя прижатыми друг к другу телами вращения.

Фрикционные передачи можно разделить на две основные группы: передачи с нерегулируемым передаточным соотношением; регулируемые передачи, которые позволяют плавно (бесступенчато) изменять передаточное отношение. Регулируемые передачи также называются вариаторами.

Фрикционные передачи с постоянным передаточным числом применяют редко. В основном они применяются в кинематических цепях приборов, где требуется бесшумность работы, плавность движения, безударное включение на ходу и т.п.

В авиастроении данные передачи не применяются. Величина передаваемой мощности обычно не превышает 10 кВт, так как при больших значениях трудно обеспечить необходимое усилие прижатия катков.

1.2.6 Передача винт-гайка (шариковая передача)

Шарико-винтовая передача (ШВП) – это линейный механический привод,

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

вращение в линейное перемещение и наоборот. Конструктивно она представляет собой длинный винт, по которому движется шариковая гайка. Внутри гайки между ее внутренней резьбой и резьбой винта по спиралевидной траектории катятся шарики, затем попадая в возвратные каналы – внутренние или внешние.

Широкое применение таких передач определяется тем, что при простой и компактной конструкции удается осуществить медленные и точные перемещения.

В авиастроении ШВП используется в механизмах управления самолетом: для перемещения взлетно-посадочных закрылков, для управления триммерами, поворотными стабилизаторами и др.

Благодаря наличию тел качения шарико-винтовая пара обеспечивает высокий КПД (свыше 80%), низкий коэффициент трения и, как следствие, повышенную износостойкость передачи. К достоинствам шарико-винтовых передач также относятся:

- высокая нагрузочная способность;
- бесшумность и плавность работы;
- высокая точность передачи;
- возможность использования с двигателями небольшой мощности;
- сравнительно невысокий нагрев в процессе работы;
- возможность продолжительной непрерывной работы.

Однако из-за малого коэффициента трения ШВП подвержены скатыванию, особенно при большом шаге резьбы. Поэтому в некоторых случаях требуется использование тормозного устройства для предотвращения самопроизвольного движения механизма.

В винтовой передаче вращение винта вызывает поступательное перемещение гайки, а вращение гайки приводит к поступательному перемещению винта.

Данный тип передачи будет использоваться для изменения положения реактивного двигателя.

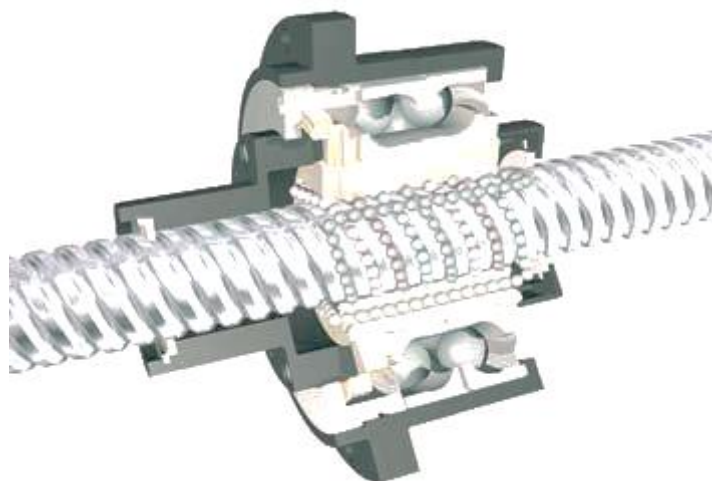


Рисунок 5 – Шарико-винтовая передача

1.3 Рулевые машины принципы и требования

В данной главе, были затронуты разные типы рулевых машин, такие как: гидравлические, электрогидравлические, электрические. Приведены основные требования, предъявляемые к этим машинам, а также сделан вывод о наиболее перспективной рулевой машине для успешного выполнения задач выпускной квалификационной работы.

Рулевой привод – это комплекс устройств, осуществляющих отклонение рулевых поверхностей по командным сигналам датчиков, систем автоматического управления и других систем, формирующих командные сигналы на отклонение рулевых поверхностей для управления ракетой и стабилизации параметров его движения. Вместе с системами формирования командных сигналов привод рулевых поверхностей составляет систему управления рулями ракеты, обеспечивающую автоматический полет по заданным траекториям. Исходя из заданных задач, решение по выбору оптимального типа рулевой машины может стать ведущим в создании всего рулевого аппарата.

1.3.1 Гидравлические рулевые машины

Основное применение в приводах рулевых поверхностей современных самолетов нашли гидравлические исполнительные механизмы – гидравлические

следящие приводы. Это объясняется тем, что гидравлические двигатели обладают самой высокой удельной плотностью (концентрацией) развиваемых усилий или моментов на единицу площади гидродвигателя, которая определяется 15 – 35 МПа. Так же из известных преимуществ гидравлического следящего привода, благодаря которым он получил столь широкое применение в системах управления самолета, отметим:

- минимальные габариты и вес привода благодаря использованию высокого уровня давления рабочей жидкости;
- высокое быстродействие и точность, которые обеспечиваются благодаря небольшому по сравнению с электроприводом моменту инерции подвижных частей исполнительного механизма гидропривода;
- простота конструкции элементов привода, обеспечивающих непрерывное регулирование скорости исполнительного механизма гидропривода, плавность и устойчивость его работы;
- высокий КПД и большой срок службы привода в условиях непрерывных реверсов, троганий и остановок, что дает гидроприводу важные преимущества перед любым другим видом приводов;
- в отличие от электропривода гидравлический следящий привод может непрерывно и длительно работать при высоких температурах окружающего воздуха, не требуя индивидуального охлаждения;
- высокая надежность и низкая стоимость привода.

К недостаткам гидроприводов следует отнести их высокую себестоимость. При изготовлении отдельных элементов гидроприводов требуется очень высокая точность (единицы микрометра), высокая культура производства и технология.

Принцип действия гидравлических приводов (не турбинного типа) основан на преобразовании потенциальной энергии давления потока жидкости в механическую энергию движения. Поэтому любой гидравлический привод состоит из источника гидравлической энергии (гидронасоса), который обеспечивает непрерывный поток жидкости высокого давления, и потребителя гидравлической энергии – гидродвигателя, преобразующего потенциальную энергию давления

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

потока жидкости в механическую энергию, необходимую для совершения полезной работы на нагрузке.

Распространены два способа регулирования скорости гидродвигателя: объемные и дроссельные. В зависимости от способа регулирования гидроприводы делят на два типа: гидроприводы с объемным и гидроприводы с дроссельным регулированием.

В гидроприводе с объемным регулированием изменение скорости гидродвигателя осуществляется изменением количества жидкости, подаваемой гидронасосом. Такой способ регулирования требует для каждого рулевого привода отдельного насоса переменной подачи. В рулевых приводах чаще всего применяются гидроприводы с дроссельным регулированием скорости гидродвигателя. В дроссельных гидроприводах в качестве источника гидравлической энергии для всех гидроприводов применяется насос постоянной подачи, обеспечивающий гидравлической энергией все гидроприводы. А в качестве регуляторов расхода жидкости, подводимой к каждому гидродвигателю, используют дросселирующие гидрораспределители, представляющие собой регулируемые гидравлические сопротивления.

1.3.2 Электрогидравлические рулевые машины

Электрогидромеханический привод рулевой поверхности с электрогидравлическими следящими приводами получает все более широкое применение на современных самолетах. Такой привод позволяет наиболее полно реализовать преимущества гидропривода и получить необходимую стабильность характеристик и надежность системы управления при минимальной избыточности элементов. Последнее объясняется тем, что такой гидропривод обладает важным преимуществом перед другими видами приводов: при резервировании гидропривода возможно наиболее эффективное использование принципов мажоритарной логики, т. е. «голосования большинством». При таком резервировании обеспечиваются не только высокая стабильность характеристик

привода, но и минимальные возмущения рулевой поверхности при возникновении в приводе или во взаимодействующих с ним системах отдельных отказов или неисправностей [1].

Электрогидравлические приводы (ЭГ) характеризуются отсутствием жесткой передачи от вала двигателя к баллеру руля. Передаточное число ЭГ систем является переменным и скорость перекладки пера руля изменяется в зависимости от положения управляющего органа насосов переменной производительности или положения золотника в системах с насосом неизменной производительности.

Принцип работы и конструктивное исполнение РМ определяется условиями эксплуатации, требованию по быстродействию и силовому моменту на выходном валу. Наибольшее распространение получили электрогидравлические РМ, управление которыми осуществляется электрическими сигналами, а силовые функции обеспечиваются средствами гидравлики. На рисунке 6 приведена принципиальная схема электрогидравлической РМ.

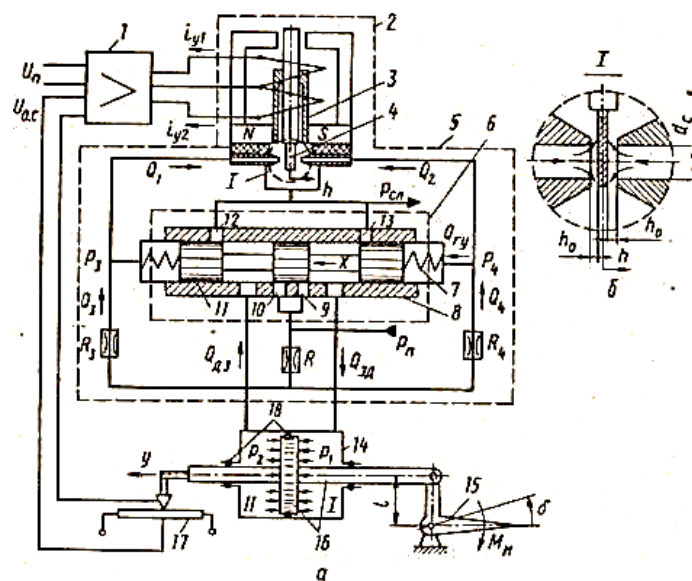


Рисунок 6 – Принципиальная схема электрогидравлического рулевого привода

При поступлении на поляризованное реле 1 командного напряжения (соответствующего по величине и знаку требуемому положению рулей), имеющего обмотку управления и обмотку обратной связи (магнитные потоки обмоток имеют противоположное направление), коромысло 2 начинает изменять своё положение в

соответствии с направлением суммарного магнитного потока. Перемещение коромысла 2, соединённого с золотниковым распределителем 3, приводит к его отклонению. При этом проходное отверстие одного перепускного отверстия увеличивается, а другого уменьшается. Соответственно изменяется расход масла через отверстия. Давление в одной из сторон цилиндра начинает возрастать, а в другой падать. Поршень 8 начинает двигаться в сторону с меньшим давлением, и через шатун 9 и кривошип 10 поворачивает выходной вал РМ 11, который связан с рулями ЛА и потенциометром обратной связи (ПОС). Сигнал с ПОС, соответствующий по величине и знаку действительному угловому положению рулей, поступит на обмотку обратной связи поляризованного реле 1. Перемещение рабочего поршня 8 будет происходить до тех пор, пока магнитные потоки на обмотке управления и обмотке ПОС не скомпенсируют друг друга [6].

1.3.3 Электрические рулевые машины

Электрический привод представляет собой систему, состоящую в большинстве случаев из: преобразователей механических (угловых и линейных) перемещений в электрический сигнал малой мощности (информационный или управляющий канал); преобразователей маломощного электрического сигнала с помощью электрических исполнительных элементов в механическую энергию (силовой энергетический или исполнительный канал) согласователей характеристик исполнительных элементов и нагрузки – редукторов.

По конструкции якоря двигателя бывают:

с цилиндрическим гладким якорем, у которых витки обмотки якоря приклеиваются к нему с помощью специальных смол с ферромагнитным наполнителем;

с дисковым якорем, представляющим собой тонкий диск из пластмассы, на который различным образом крепится якорная обмотка;

с полым немагнитным якорем, у которых якорная обмотка впрессована в стакан-якорь из немагнитного материала. Указанные модификации

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

конструкций якоря отражают тенденцию создания двигателей с якорями, обладающими наименьшим моментом инерции. Эта тенденция объясняется тем, что отношение момента, развиваемого двигателем, к моменту инерции его якоря является одним из главных критериев динамических качеств двигателя. Двигатель совместно с усилителем мощности (УМ) и редуктором образует исполнительный электромеханизм или силовой электропривод.

Важнейшими характеристиками исполнительных электромеханизмов являются:

механическая характеристика, устанавливающая зависимость между скоростью (перемещением) и моментом (силой) исполнительного элемента в функции параметра управления (напряжения или тока), например, $M = f(\Omega, U_{\text{я}})$ (табл. 1);

регулирующая характеристика, устанавливающая зависимость между управляемым параметром (скоростью, моментом) и управляющим сигналом (напряжением, током) при постоянном значении величины нагрузки M_n , например, $\Omega = f(U_{\text{я}}, M_n)$ (см. табл. 1).

Приводы с полупроводниковыми усилителями мощности. В сравнительно маломощных электроприводах, например, рулевых приводах ЛА, в качестве усилителя мощности используется, как правило, усилитель на элементах полупроводниковой техники (транзисторах и тиристорах). В качестве метода управления исполнительным двигателем (ИД) применяются: непрерывный, импульсный и релейный. схемы импульсного управления двигателем имеют высокий КПД, что характерно для релейного управления, и позволяют непрерывно управлять средними значениями скорости и момента, что при высокой частоте следования импульсов позволяет использовать преимущества непрерывного управления.

В соответствии с функциональной схемой в приводе используется исполнительный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. Привод предназначен для компенсации ошибки между требуемым положением руля $\delta_{\text{ж}}$, задаваемым потенциометром-датчиком (ПД), и истинным – δ . Напряжение ошибки

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

ΔU постоянного тока преобразуется в предварительном усилителе напряжения (УН) и в полупроводниковом усилителе мощности (УМ) в напряжение $U_{я}$, подаваемое на ИД. Исполнительный двигатель через силовой редуктор вращает руль. Одновременно с рулем поворачивается движок потенциометра-приемника (ПП). Разность напряжений ПД и ПП создает напряжение ΔU ошибки, которое заставляет ИД поворачивать руль в направлении устранения углового рассогласования $\Theta = \delta_{ж} - \delta$.

Привод переменного тока. Приводы переменного тока используются в многочисленных авиационных приборах (см. табл. 1) в системах дистанционной передачи информации, рулевых приводах и т. п. В качестве исполнительного двигателя в рассматриваемом приводе используется асинхронный двухфазный двигатель (АДД) с полым ротором из немагнитного металла.

Таблица 1 – Типы приводов

Тип привода Схема харак- теристики	Привод постоянного тока	Привод переменного тока	Муфтаый привод
Функциональная схема			
Механические характеристики			
Регулировочные характеристики			
Кинематика исполнительного механизма			

(ОУ) АДД подключена к выходу усилителя обмотки управления (УОУ), а обмотка возбуждения (ОВ) – к усилителю обмотки возбуждения (УОВ).

В качестве элементов синхронной связи в рассматриваемом приводе используются потенциометры (ПД-ПП), на которые подается напряжение постоянного тока. Разность напряжений, снимаемых с движков ПД и ПП, пропорциональна угловому рассогласованию θ . В электронном усилительно-преобразовательном устройстве (ЭУПУ) напряжение Л(У постоянного тока преобразуется в переменное напряжение, которое через УОУ подается на обмотку управления, а через УОВ – на обмотку возбуждения. Фазовое смещение напряжений U_y, U_h с выходов УОУ и УОВ ($+ 90^\circ$) задает направление вращения ИД, а амплитуды этих напряжений определяют скорость (момент) ИД.

Исполнительный двигатель через редуктор вращает стрелку показывающего прибора. Одновременно с ней поворачивается движок ПП, напряжение с которого пропорционально истинному положению стрелки β . В состоянии функционирования привод должен устранить ошибку, т. е. стрелка прибора должна информировать летчика (штурмана) об истинном значении контролируемого параметра.

Механические характеристики АДД не линейны (см. табл. 1). Поэтому динамика привода подобного типа должна описываться нелинейными уравнениями.

Рулевой привод с муфтами. Исполнительный механизм следящего привода с управляемыми электромагнитными муфтами представляет собой кинематическое соединение двух муфт и приводного двигателя (см. табл. 1). В таблице показан привод поверхности управления ЛА.

Электромагнитные муфты выполняют роль управляющих элементов, с помощью которых механическая энергия передается от приводного двигателя к нагрузке.

Рассогласование между требуемым $\delta_{ж}$ и истинным δ положениями руля фиксируется элементами синхронной связи – потенциометрами датчиков (ПД) и приемника (ПП). Напряжение ΔU ошибки в усилительном тракте привода через

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

усилители У1 и У2 подается на обмотки управления муфтами. Величина и знак момента на выходном валу привода, связанного с выходным валом исполнительного механизма редуктором с передаточным отношением q , будут определяться тем, какая из муфт развивает больший момент. Под действием момента от блока муфт выходной вал, а вместе с ним и поверхность управления (рули горизонтальные и вертикальные, элероны, триммеры и т. п.) поворачиваются в направлении требуемого положения $\delta_{ж}$, т. е. в направлении уменьшения ошибки.

Из механической и регулировочной характеристик привода с муфтами (см. табл. 1) следует, что в таком типе привода регулируется момент M , развиваемый блоком муфт; управляющим сигналом муфт является ток $i_y = i_1 - i_2$.

1.3.4 Требования к динамике рулевого привода как исполнительного элемента системы стабилизации

В теории систем автоматического управления ЛА при приближенных расчётах быстродействие систем стабилизации и наведения принято характеризовать шириной полосы пропускаемых частот. Полосу пропускания при этом определяют частотой среза $\omega_{ср}$ разомкнутого контура рассматриваемой системы или резонансной частотой замкнутого контура системы.

С увеличением полосы пропускания увеличивается быстродействие системы. Но с увеличением полосы пропускания увеличивается влияние помех и шумов, присутствие которых в полезных сигналах является характерной особенностью систем управления ЛА. Поэтому выбор величины полосы пропускания должен быть достаточно обоснованным.

Величину полосы пропускания системы наведения $\omega_{с.н}$ определяет ширина амплитудно-частотного спектра управляющих воздействий. Система наведения должна достаточно точно реагировать на управляющие воздействия. Для этого полоса пропускания $\omega_{фв}$ должна быть большей, чем полоса основных частот управляющего воздействия.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Контур системы стабилизации в свою очередь должен достаточно точно воспроизводить сигналы системы наведения и отфильтровывать случайные составляющие. Если полоса пропускания системы стабилизации $\omega_{ст}$ выбрана малой, то контур стабилизации будет вносить большие амплитудные и фазовые искажения в процессы наведения и стабилизации ЛА. Если, например, считать допустимым, что система стабилизации вносит в систему наведения фазовые искажения (сдвиги по фазе), не превышающие $—15^\circ$, а искажения по амплитуде не более 10 %, то в этом случае полосы пропускания систем наведения $\omega_{с.н}$ и стабилизации $\omega_{ст}$ должны удовлетворять условию

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{с.н}} \geq 3. \quad (1)$$

С другой стороны, полоса пропускаемых частот системы стабилизации должна быть больше собственных частот $\omega_{ла}$ короткопериодических колебаний ЛА, который входит в систему стабилизации как объект управления. Если это условие не выполнено, то система стабилизации не сможет полностью использовать маневренные возможности ЛА. Приблизённо принято считать, что система стабилизации обладает достаточным быстродействием, если выполняется условие

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{ла}} \geq 2. \quad (2)$$

При увеличении полосы пропускания системы стабилизации существенно усиливается влияние малых параметров элементов системы на её динамические свойства, что усложняет обеспечение устойчивости контура стабилизации.

При выборе быстродействия рулевого привода следует исходить из требований, предъявляемых к нему как элементу системы стабилизации, в которую он входит как внутренний замкнутый контур. Достаточно точно сформулировать требования к рулевому приводу можно только на основании тщательных исследований динамики и точности всей системы управления.

На предварительных этапах проектирования прибегают к приближенным оценкам требуемого быстродействия привода. Рулевой привод, являясь

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

внутренним контуром системы стабилизации, должен обрабатывать сигналы этой системы с достаточной степенью точности, поэтому полоса пропускания рулевого привода $\omega_{п.пр}$ должна быть в K_B раз больше полосы частот системы стабилизации

$$\omega_{п.пр} > K_B \cdot \omega_{ст} \quad (3)$$

Коэффициент K_B можно рассматривать как коэффициент требуемого быстродействия рулевого привода.

Различные авторы по-разному подходят к выбору конкретной величины K_B . Желание облегчить сложную задачу обеспечения устойчивости контура системы стабилизации приводит к тому, что иногда требуют, чтобы выполнялось условие $K_B = 10$, т.е. $\omega_{п.пр} \approx 10 \omega_{ст}$. Тогда искажения, вносимые приводом в систему стабилизации, не превышают единиц процентов по амплитуде и нескольких градусов по фазе. Иначе говоря, при анализе динамики системы стабилизации представляется возможность считать приводы безынерционным звеном, равным коэффициенту пропорциональности $K_{пр}$. Такой подход к динамике привода в принципе неправилен и возможен только в некоторых исключительных частных случаях. Чем выше собственная частота короткопериодических колебаний ЛА, тем труднее реализовать равенство $\omega_{п.пр} \approx 10 \omega_{ст}$.

Полоса пропускания рулевого привода зависит от типа привода, а также от характера и величины преодолеваемой им нагрузки. Для каждого типа привода при заданной нагрузке она мало изменяется.

При попытках увеличить полосу пропускания привода хотя бы в 1,5 раза, приходится идти на серьёзное усложнение схемы привода и увеличение его мощности. Увеличение же мощности привода, являющегося наиболее энергоёмким элементом системы стабилизации, ведёт к увеличению источников энергии, которые по габаритным размерам и массе значительно больше, чем собственно рулевой привод. Все это накладывает ограничения на выбор величины полосы пропускания привода. Конкретные величины K_B зависят от многих факторов: типа ЛА, принятого способа наведения, быстродействия системы стабилизации,

рассматриваемого канала управления и поэтому не могут быть однозначными. Ориентировочно можно считать выполнимым условие

$$\frac{\omega_{п.пр}}{\omega_{ст}} \approx 3 \dots 3,5. \quad (4)$$

Главной мерой точности привода как динамического исполнительного устройства в режиме стабилизации является величина фазовых искажений (сдвигов) $\Delta\Psi_{пр}$, вносимых приводом в контур стабилизации. Современная тенденция развития высокоманевренных ЛА ведет к тому, что частоты $\omega_{ла}$ и $\omega_{ст}$ все время растут. Поэтому рулевой привод оказывает все более сильное влияние на динамику системы стабилизации, ухудшая ее устойчивость. Умение правильно оценить динамические свойства привода становится все более актуальным.

1.3.5 Заключение

Преимущество электрических приводов, в частности исполнительных электромеханизмов (ИЭМ) по сравнению с гидроприводами, оказывается особенно ощутимым при сравнительно невысоких значениях потребной мощности на выходном валу. В этом случае применение электрических исполнительных устройств оказывается более выгодным как по энергетическим, так и по объемно-массовым показателям.

Исходя из заявленных технических требований, и перечисленных достоинств электрических рулевых машин, был сделан вывод о том, что данный тип рулевых машин является оптимальным для выполнения задач выпускной квалификационной работы.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

2 ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТА ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СОПЛА РАКЕТЫ

Исходя из предложенного двигателя, необходимые характеристики которого приведены в таблице 2, и программного кода в выпускных квалификационных работах [13] [14].

Таблица 2– Заданные параметры исполнительного органа

Параметр	Значение параметра
Число фаз	3
Мощность номинальная Вт.	450
Напряжение номинальное фазное/линейное В.	48.5/28
Число пар полюсов	4
Активное сопротивление обмотки статора Ом	0,05
Индуктивность обмотки статора Гн	$5 \cdot 10^{-5}$
Частота вращения номинальная об/мин	955

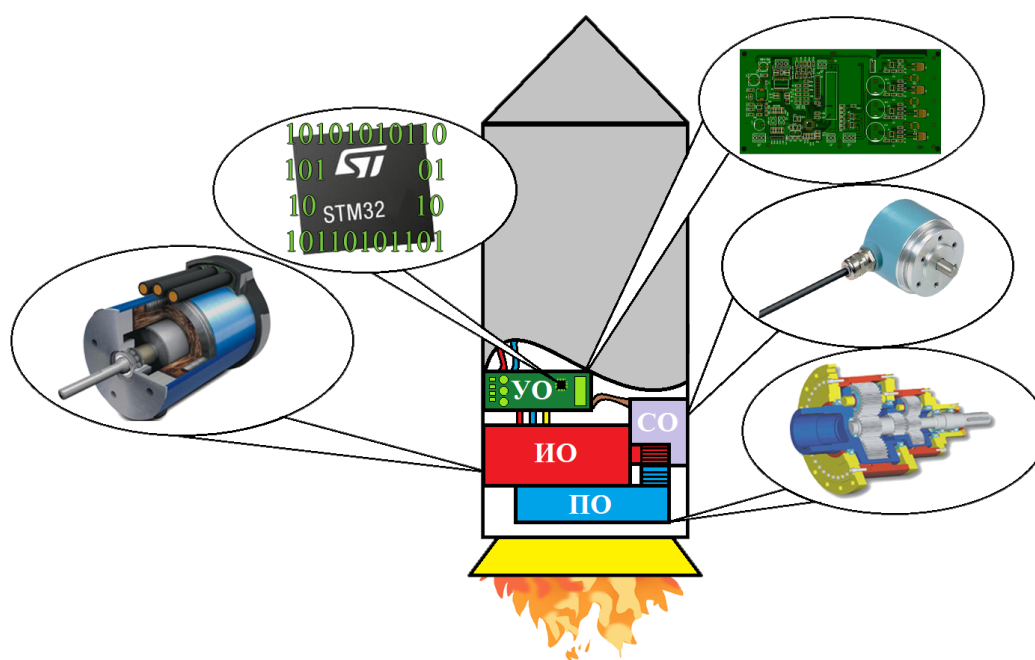


Рисунок 7 – Принцип работы системы управления поворотом сопла ракеты.

Можно приступить к созданию платы управления. Данная плата по средствам связи с энкодером, должна определять положение сопла, и в последствие осуществлять управление процессом ориентации космического аппарата.

Для того, чтобы представлять, какое важное место занимает плата управления в проектировании ракет, необходимо понимать суть всего процесса управления сопла ракеты. На рисунке 7 показан принцип работы данной сложной системы.

С органа управления (ОУ) поступает управляющий сигнал непосредственно на исполнительный орган (ИО), после чего, по средствам редуктора (промежуточного органа ПО) осуществляется передача момента на сопло ракеты.

С помощью связующего органа (СО) плата управления получает необходимую информацию для дальнейшего взаимодействия с бортовой эвм и контролем над исполнительным органом.

2.1 Описание работы платы

Для наглядного представления работы платы, была составлена следующая блок-схема (см. рис. 8).

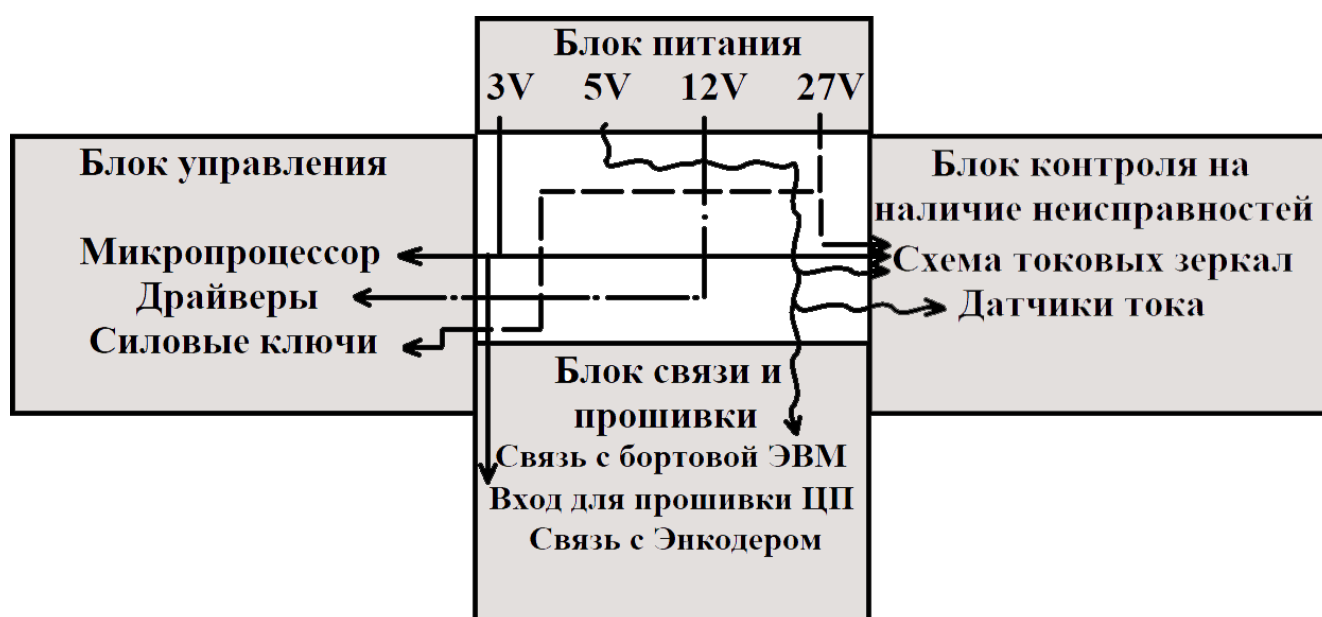


Рисунок 8 – Структурная платы управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Исходя из представленной блок схемы, можно понять, что с блока питания, приходит питание в виде 3, 5, 12 и 27 вольт на блоки управления, связи и прошивки, контроля на наличие неисправностей.

В свою очередь блок управления с помощью микропроцессора и драйверов осуществляет контроль, над силовыми ключами, а значит управление над двигателем.

Блок связи и прошивки осуществляет, обратную связь с бортовой электронно-вычислительной машиной, по средствам программатора, позволяет сменить программный код на самом микропроцессоре, а также, осуществляет связь последнего с энкодером.

Блок контроля на наличие неисправностей с помощью схемы токовых зеркал, осуществляет измерение и стабилизацию напряжения на шине. А в случае неисправности двигателя датчики тока сообщат об этом микропроцессору, после чего станет возможным автоматическое включение резервной системы.

2.1.1 Блок питания платы

Для преобразования 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

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

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 9).

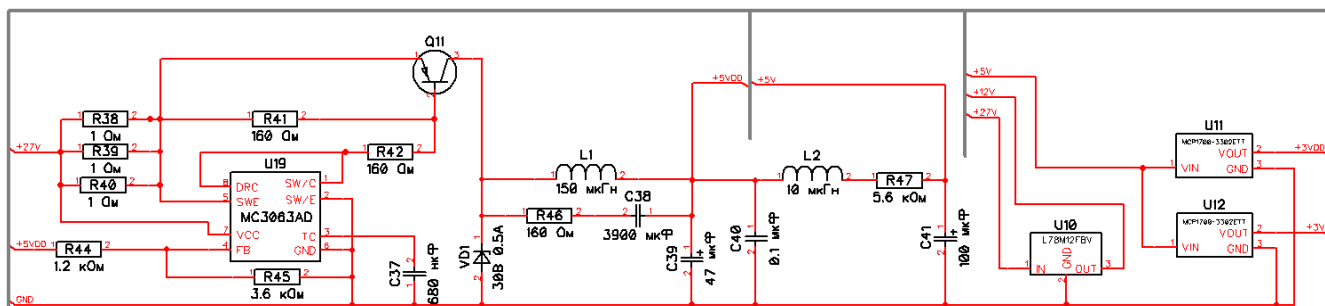


Рисунок 9 – Принципиальная электрическая схема блока питания

В схеме используется понижающий DC/DC преобразователь MC3406, максимально допустимый ток для данной схемы составляет 1,5 ампера. Для обеспечения непрерывным снабжением тока в нагрузке, был выбран индуктивный накопитель L1. Снижение общих пульсаций достигается с помощью конденсатора C37. Диод D4 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.

При закрытом силовом ключе ток индуктора линейно нарастает. Он течёт через нагрузку и выходной конденсатор С40. Когда напряжение на нём достигает порога регулирования блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ), реализованного внутри коммутирующего элемента, ключ разрывает цепь. При открытом ключе ток в цепи нагрузки не прекращается, поскольку в работу вступает диод D4, предотвращающий разрыв цепи. Энергия, запасённая в индуктивности, «перекачивается» в нагрузку. Ток индуктора начинает линейно падать. Когда напряжение на конденсаторе С40 становится равным нижнему порогу регулирования блока ШИМ, ключ закрывается и цикл повторяется.

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 (элементы С41, С42, L2, R40). Конденсаторы С41 и С42 являются электролитическими, используются для обеспечения устойчивости и стабильности схемы.

На выходе получены цифровые (+5VDD) и аналоговые (+5V) 5 вольт. С помощью линейных стабилизаторов MCP1700T-3302ETT, которые выполняют роль регуляторов напряжения с низким током покоя и малым падением напряжения, полученные ранее 5 вольт преобразуются в цифровые (+3VDD) и аналоговые (+3V) 3 вольта. Максимально допустимый ток для данных преобразователей составляет 0,25 ампер. Прецизионный регулятор напряжения L78M12ABV преобразует из 27 в 12 вольт, допустимый ток составляет 0,5 ампер.

Таким образом, данный блок осуществляет питание остальных функциональных блоков, постоянным напряжением в 3, 5, 12 и 27 вольт.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

2.1.2 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.

На принципиальной схеме процессор обозначается как U4 (см. рис. 10). Блок U4.2 является питающим. Питание осуществляется цифровыми (+3VDD) и аналоговыми (+3V) 3 вольтами. Конденсаторы C19 – C24 подключены к выводам питания микроконтроллера для выравнивания напряжения.

Так же, можно заметить кварцевый резонатор Y1, он установлен для обеспечения заданной стабильной тактовой частотой. Элементы C15, C16, R28 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, предусмотрены два светодиода, и тактовые кнопки пользователя S2 и 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 C15 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. Кнопка S2 является кнопкой пользователя, предназначенной для чередования режимов прописываемых в микроконтроллер программ. Работает она по такому же принципу, как и кнопка сброса. В тот момент, когда S1 отжата, через резисторы R31 и R32 происходит заряд конденсатора. При этом на входе, к которому подключена кнопка, высокий уровень напряжения. При нажатии кнопки, происходит разряд конденсатора C16 через резистор R31. Напряжение на выводе становится равным нулю. Резистор R32 является внешним подтягивающим резистором. Он удерживает вход в состоянии логической единицы, пока внешняя цепь разомкнута [18].

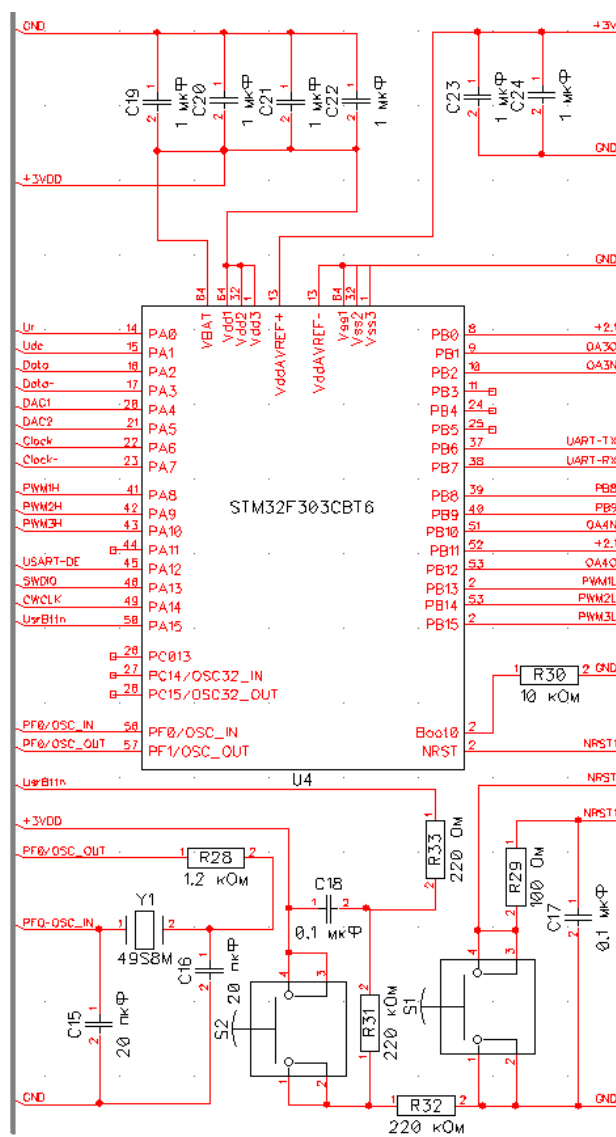


Рисунок 10 – Схема подключения микроконтроллера

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

С помощью программы STM32CubeMX, были выбраны ножки микропроцессора для правильного написания кода и формирования нужных сигналов, так, были выбраны ножки PA6 и PA7 для связи с энкодером. Данные выводы могут обрабатывать сигналы в режиме таймер счетчика TIM3 который подходит для работы с энкодером.

Вывод VOOT0 микроконтроллера предназначен для управления загрузкой. Так как в нашем устройстве он не используется, он был деактивирован через резистор R30 на землю.

По средствам связи, микропроцессор осуществляет управление над драйверами IRS2011SPBF (см. рис. 11). 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 1 ампер. Соответственно, в стойках можно использовать транзисторы с током стока в 10-20 раз большим.

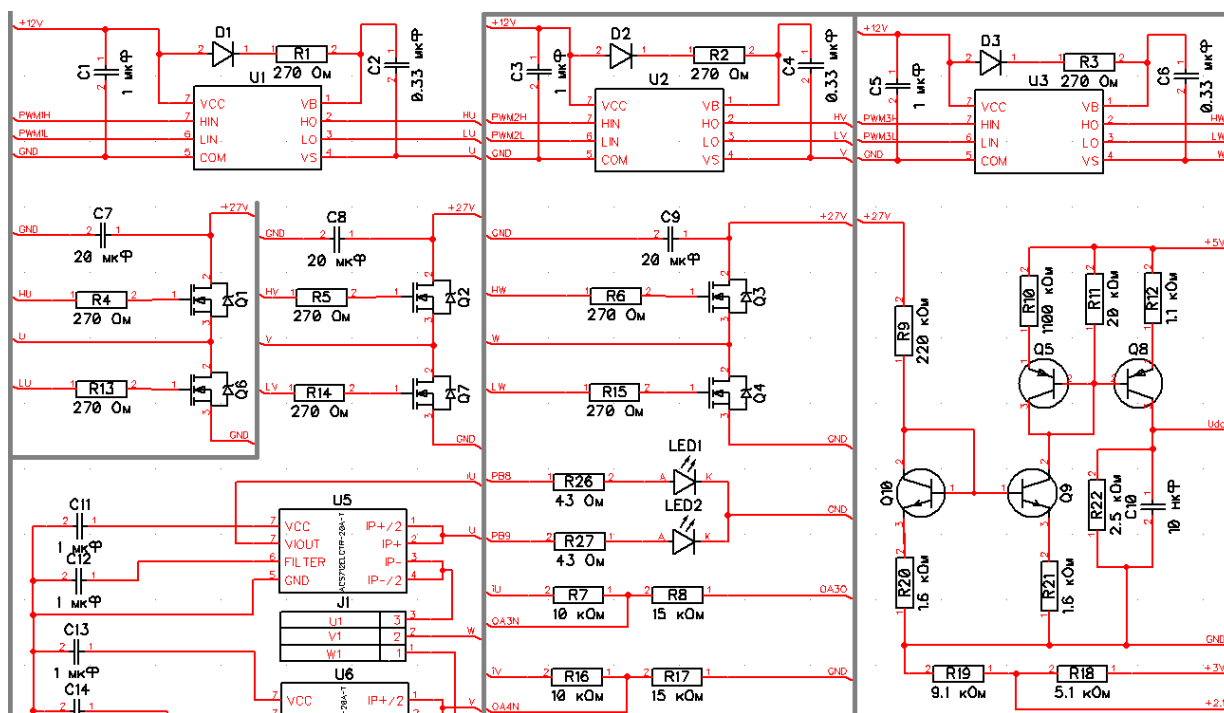


Рисунок 11 – Принципиальная электрическая схема подключения драйверов управляющих силовыми ключами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Так же стоит упомянуть, что драйверы потребляют энергию только во время переключения силовых ключей, соответственно на прецизионном регуляторе напряжения L78M12ABV 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 трёх силовых ключей IRFR5305PBF 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 протекающим через обмотки, т.е. вектором магнитного поля статора, таким образом регулируется момент, действующий на ротор, знак угла определяет направление момента.

Поскольку номинальный ток вентильного двигателя составляет 20 ампер, то были выбраны ключи на максимально допустимые токи в 28 ампер, и напряжение в стоке и истоке 55 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.

2.1.3 Блок связи и прошивки

Данный блок предназначен для взаимодействия платы с внешними (бортовыми) электронно-вычислительными машинами, а также, для смены функционирующей программы в микропроцессоре на новую, иначе говоря для прошивки нового программного кода. Так же в этот блок следует отнести связь с энкодером, которая осуществляется по средствам клемника DB-9F. Схема данного блока изображена на рисунке 12.

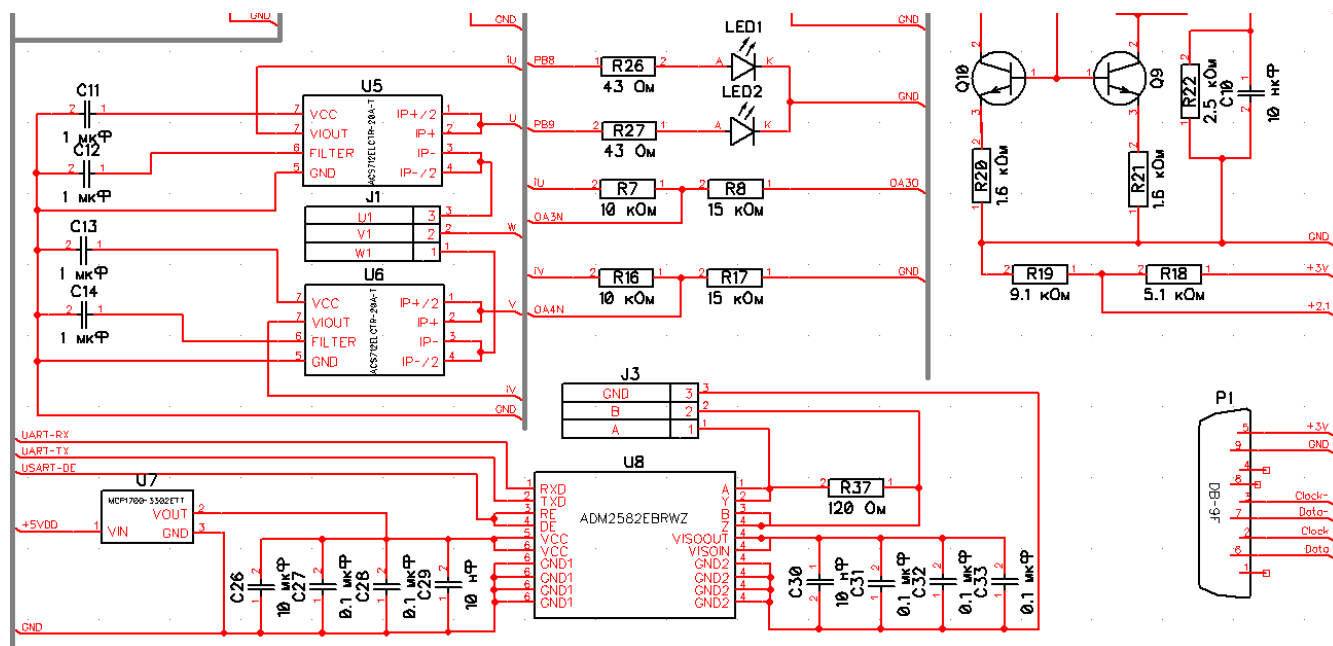


Рисунок 12 – Принципиальная схема блока связи и прошивки

Рядом с приемопередатчиком RS-485, изображён SWD-разъем P2 интерфейса прошивки микропроцессора и отладки кода с последовательным доступом. Для облегчения процесса отладки предусмотрены два светодиода о которых говорилось ранее LED1 и LED2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

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 подключения схемы к компьютеру предусмотрен асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485. Интерфейс RS-485 или RS-422 – один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи. Физический уровень — это канал связи и способ передачи сигнала. Сеть, построенная на интерфейсе RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары — двух скрученных проводов. В основе интерфейса RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных. Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причем по одному проводу идет оригинальный сигнал, а по-другому — его инверсная копия.

Аппаратная реализация интерфейса — микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам UART контроллера). В схеме применена микросхема приемо-передатчика ADM2582EBRWZ в полудуплексном включении, имеющая гальваническую развязку и встроенный, включая трансформатор, DC/DC конвертер. Дуплекс и полудуплекс – это режимы передачи в котором работает приемник и передатчик. При дуплексном режиме приемник и передатчик работают одновременно, при полудуплексном поочередно. Перед питанием микросхемы реализован линейный стабилизатор MCP1700T-3302ETT. Конденсаторы C26 — C33 являются составной частью внутреннего преобразователя напряжения микросхемы, обеспечивающей гальваническую развязку.

Для прошивки флеш-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.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Предполагается, что со стороны компьютера будет использован преобразователь интерфейсов USB/ RS-485 без гальванической развязки. Данный конвертер позволяет подключать оборудование с интерфейсом RS-485 к USB порту компьютера или ноутбука. Для подключения конвертера к схеме был использован клеммник 306 серии KLS2-128I-5.00-03P-4S на схеме обозначается как J3.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что данный блок имеет весьма понятный и распространённый, асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485, с помощью которого не составит труда обновить программный код в микроконтроллере. Имеются два диода с помощью которых можно определить состояние платы, присутствует схема обратной связи с бортовой электронно-вычислительной машиной, а также связь с энкодером который находится на валу исполнительного органа [12].

2.1.4 Блок контроля на наличие неисправностей

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

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

повышенной изоляцией и успешно взаимодействует с другими видами электронных компонентов [9].

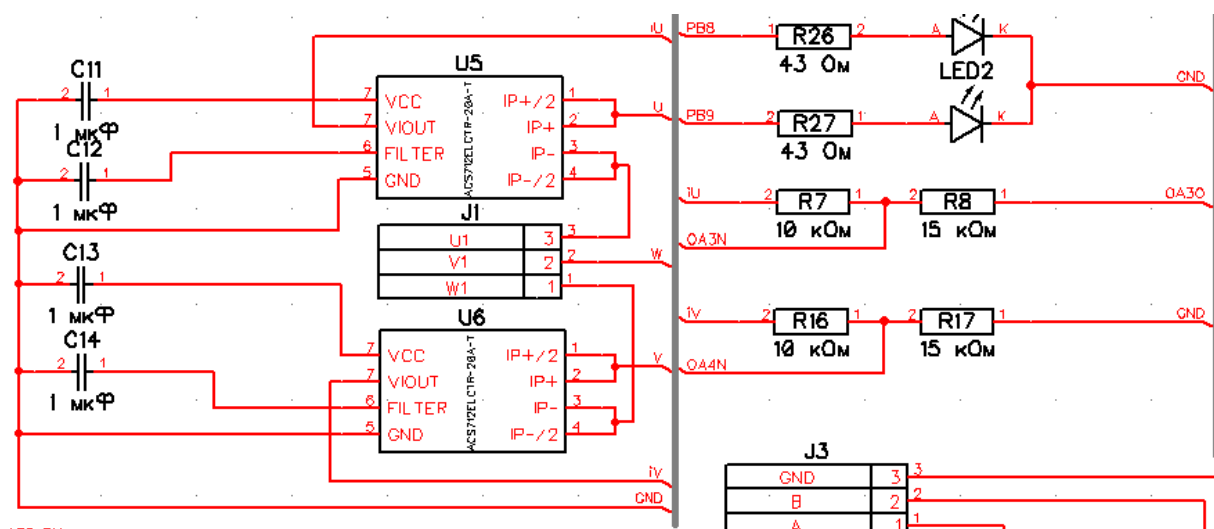


Рисунок 13 – Схема подключения датчиков тока

Была собрана схема из двух таких датчиков, которые снимают показатели тока с фазы U и V соответственно. Три датчика в данном случае будут избыточны, поскольку в случае обрыва фазы W, ток на фазах V и U увеличится в 1,5 раза, что приведет к срабатыванию защиты и оповещению о неисправности микропроцессору STM32F303CBT6, после чего по средствам связи с бортовой электронно-вычислительной машиной возможно переключение на систему резервирования. В случае возникновения обрыва по фазам U или V, на первом датчике ток увеличится в 1,5 раза, а на втором связь с исполнительным органом прервется, что так же приведёт к срабатыванию оповещающего сигнала. Конденсаторы C11 – C14 установлены для стабильного питания схемы.

Так же в данный блок входит схема для измерения напряжения шины постоянного тока. Задача измерения напряжения шины постоянного тока питающей силовой мост частотного преобразователя или реверсивного синхронно-векторного выпрямителя (АВН) не является тривиальной. Суть ее в том, что высокое напряжение необходимо преобразовать к шкале АЦП управляющего микроконтроллера (от 0 до 3 В). Типовое решение – делить напряжения из двух резисторов. Однако, диапазон низкого напряжения (до 50% от номинального), как

правило, не является рабочим. Соответствующая часть шкалы АЦП не используется. На рисунке 14 представлена схема решающая обозначенное затруднение. Температурная стабильность схемы обеспечена токовыми зеркалами (симметрией схемотехнического решения). Сопротивления в цепи эмиттеров балансируют зеркала, снижая чувствительность схемы к статистической вариации падения напряжения на переходе база-эмиттер для экземпляров транзисторов.

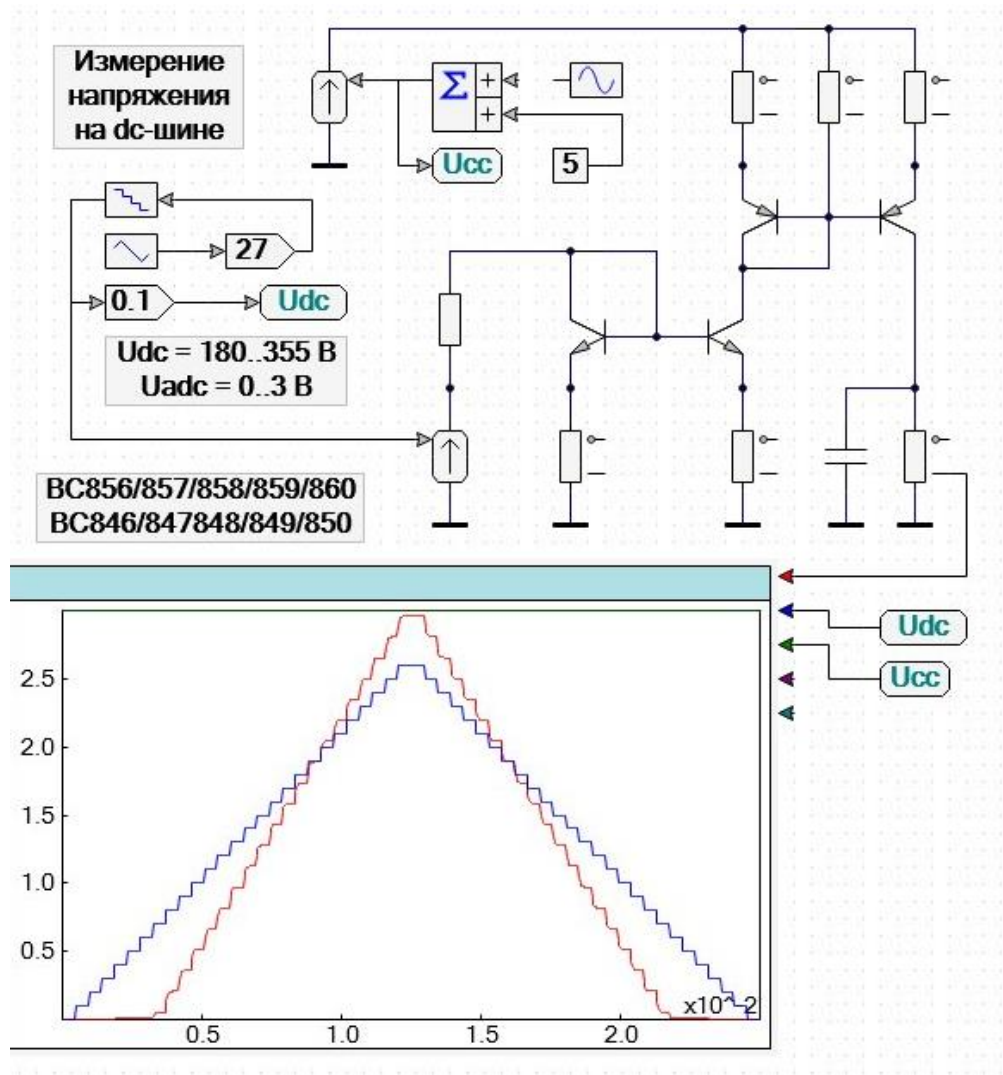


Рисунок 14 – Схема измерения напряжения питания силового моста частного преобразователя

С помощью программы Jigrein были рассчитаны и подобраны резисторы данной схемы, так R12 = 1,1 кОм, R11 = 20кОм, R10 = 1,1Мом, R9 = 220кОм, R22 = 2,5кОм, R21, R20 = 1,8кОм [16].

Рассмотрим стандартную схему токового зеркала, которое представлено на рисунке 15.

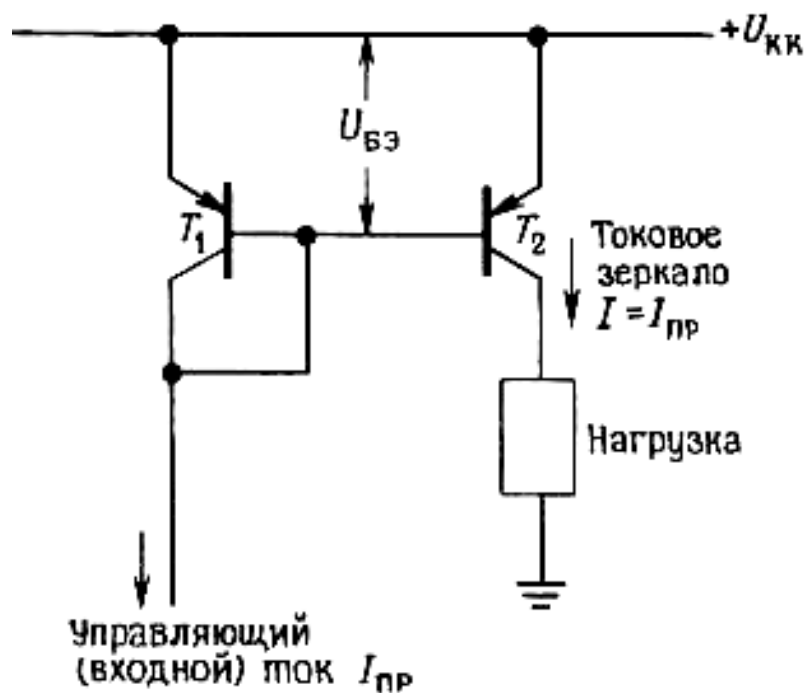


Рисунок 15 – токовое зеркало

Работа токового зеркала программируется путём задания коллекторного тока на транзисторе Т1 напряжения база-эмиттер, устанавливается в соответствии с заданным током и типом транзистора. Повышение напряжения на базе приводит к открытию транзистора, в следствие чего появляется коллекторный ток, тот в свою очередь отбирает на себя большую часть входного тока и начинает препятствовать дальнейшему росту напряжения на базе. В результате оказывается задан режим схемы и транзистора Т2, согласованный с Т1 передаёт в нагрузку такой же ток как и на Т1.

Одним из достоинств данной схемы, состоит в том, что диапазон устойчивости по напряжения равен входному напряжению $U_{кк}$ [11].

2.2 Выбор абсолютного энкодера.

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, 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 16.

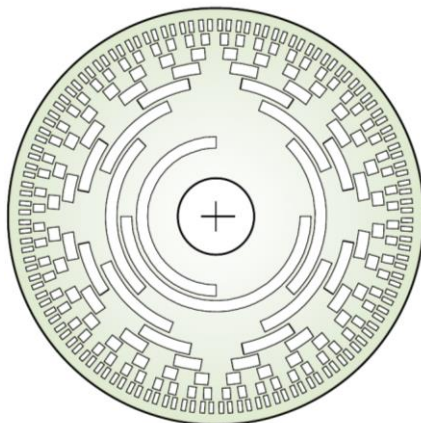


Рисунок 16 – Лимб с девятью дорожками кодовой шкалы.

В основе принципа действия таких преобразователей лежит анализ позиционного сочетания уровней сигналов дискретных фотоприемников, располагаемых в формируемой светотеневой картине соответствующих

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

концентрических кольцевых кодовых дорожек или на одной дорожке (в случае однопорожечного 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.

Как правило, для многодорожечных шкап преобразователей положения используют позиционные коды. Их особенность заключается в том, что в отличие от обычных кодов, они обладают свойством непрерывности бинарной комбинации (так называемая «одношаговость кода»): изменение кодируемого числа на единицу соответствует изменению кодовой комбинации только в одном разряде (см. рисунок 17).

Это свойство позволяет свести погрешность считывания кода к значению младшего разряда, обеспечив, тем самым, высокую информационную надёжность преобразования угол-кода [15].

Наибольшее распространение среди кодов этого класса получил код Грея. Этот код обладает способностью зеркального отображения информации, то есть инвертированием старшего бита можно менять направление счета и, таким образом, задавать направление вращения вала преобразователя. Для осуществления дальнейшей обработки Грей-кода на основе законов двоичной математики его преобразуют в двоичный код. Реализацию такого кодового преобразования легко осуществить с помощью логических элементов «исключающее или» аппаратным, или программным способами.

Для получения значений кода на один оборот вала, кратных одному угловому градусу, используют укороченный код Грея, начальное значение

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

которого не соответствует нулевой позиции обычного кода Грея, а имеет значение некоторого смещения, позволяющего при замыкании кодовой последовательности сохранить основные его свойства.

Десятичный код	Двоичный код	Код Грея
	2^3 2^2 2^1 2^0	
0	0 0 0 0	0 0 0 0
1	0 0 0 1	0 0 0 1
2	0 0 1 0	0 0 1 1
3	0 0 1 1	0 0 1 0
4	0 1 0 0	0 1 1 0
5	0 1 0 1	0 1 1 1
6	0 1 1 0	0 1 0 1
7	0 1 1 1	0 1 0 0
8	1 0 0 0	1 1 0 0
9	1 0 0 1	1 1 0 1
10	1 0 1 0	1 1 1 1
11	1 0 1 1	1 1 1 0
12	1 1 0 0	1 0 1 0
13	1 1 0 1	1 0 1 1
14	1 1 1 0	1 0 0 1
15	1 1 1 1	1 0 0 0

Рисунок 17 – Виды кодировок.

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.

2.2.1 Принцип действия преобразователей

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 фотоприемное устройство представляет собой анализирующую маску в виде одной узкой щелевой диафрагмы с установленной за ней линейкой фотодиодов.

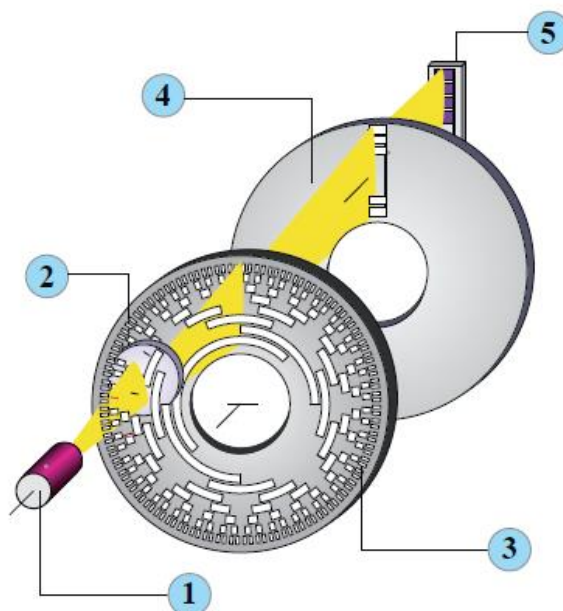


Рисунок 18 – Считывающее устройство.

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.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

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 фотоприемное устройство, а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприемников.

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

2.2.2 Основные характеристики

1) Класс точности

Пределы допускаемого значения погрешности перемещений А д в соответствии с ГОСТ 26242-90 гарантируются при нормальном значении температуры 20°C с допустимыми отклонениями:

- для класса точности 3 - $\pm 0,5$ °С
- для класса точности 6 - $\pm 2,0$ °С
- для классов точности 7 и 8 - $\pm 5,0$ °С.

2) Конструктивные особенности

В обозначении преобразователя первые буквы, стоящие после аббревиатуры ЛИР несут следующую информацию:

ДА - абсолютные,

ДК - квазиабсолютные, ДР - на основе резольвера,

ДС - синусоидальные.

Следующая за ними первая цифра 1 или 2 несут информацию о его конструкции:

- с цельным выходным валом
- с полым выходным валом

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

Последующие цифры обозначают максимальный диаметр корпуса преобразователя в мм. Буква – модификация преобразователя (различие по габаритно-присоединительным размерам и техническим характеристикам). В зависимости от варианта установки на корпусе преобразователя соединителя или выхода кабеля имеют место 4 исполнения:

- соединитель сбоку;
- соединитель с торца;
- кабель сбоку;
- кабель с торца.

В зависимости от интервала рабочих температур отличают исполнения:

- Н-нормальное,
- Т -температурное.

3) Степень защиты

Преобразователи углового положения имеют степени защиты – IP50, IP64, IP65. Первая цифра шифра характеризует степень защиты от воздействия твердых тел, вторая - от воздействия воды.

2.2.3 Типы выходных сигналов и рекомендуемые схемы подключения

Стандартный TTL(ТР)

- Выходные сигналы – уровни TTL: Ш $>2,4$ В, Ш $<0,5$ В при $I < 20$ мА
- Входные управляющие сигналы OE1, OE2, LE – уровни TTL
- Формирователь выходного сигнала GD – 74НСТ14, 74АС14

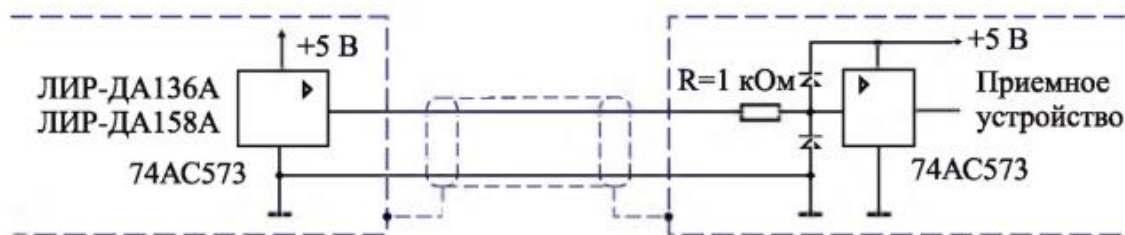


Рисунок 19 – Стандартный вид подключения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Открытый коллектор (OC)

- Напряжение питания $U_{пит} = +5\text{ В}; +12\text{ В}; +24\text{ В}$ (ЛИР-ДА158)
- Максимальное коммутируемое внешнее напряжение $U_{вн} = +50\text{ В}$
- Максимальный коммутируемый ток $I_{ое} = 50\text{ мА}$
- Формирователь выходного сигнала GD KT3130

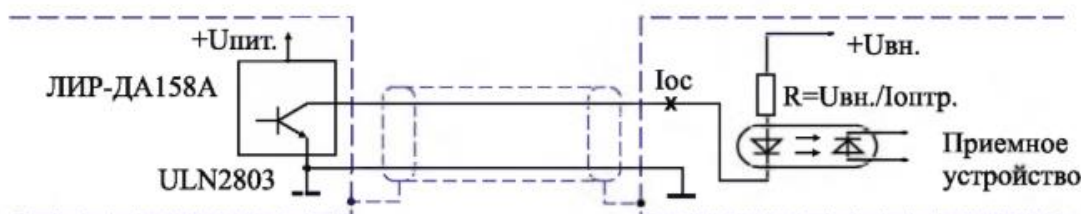


Рисунок 20 – Вид подключения с открытым коллектором

Открытый Эмиттер (OE)

- Напряжение питания $U_{пит.} +5\text{ В}; +12\text{ В}; +24\text{ В}$ (ЛИР-ДА158)
- Максимальный коммутируемый ток $I_{ое} 50\text{ мА}$
- Выходное напряжение U_{out} при $I_{ое} = 100\text{ мА}$, не менее ($U_{п} - 1,8$) В
- Формирователь выходного сигнала GD KT3130

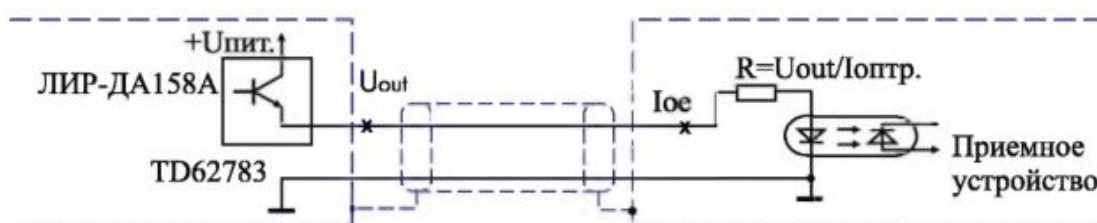


Рисунок 21 – Вид подключения с открытым эмиттером

Последовательный SSI (RS)

Выходные сингалы – стандарт RS422/RS485.

Популярный последовательный интерфейс передачи данных, предназначенный для промышленных применений. Основан на RS422, часто применяется в датчиках.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

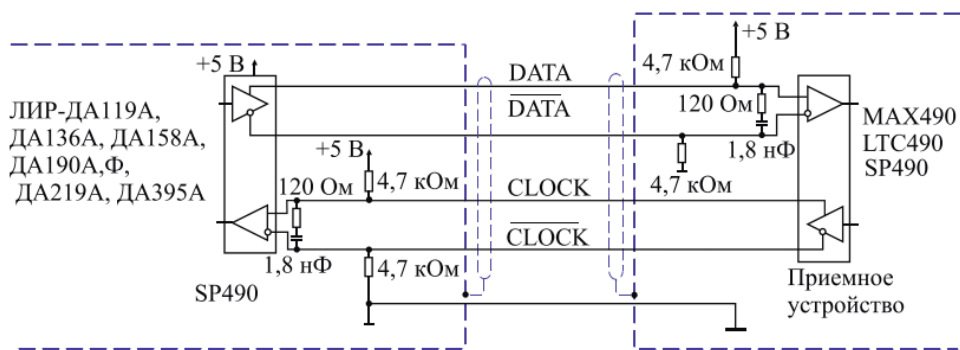


Рисунок 22 – Вид подключения с открытым эмиттером

2.2.4 Способы выдачи данных

Последовательный SSI без сигнала ALARM

- CLOCK - входной управляющий сигнал;
- DATA - выходной сигнал;
- n - число разрядов преобразователя;
- DO - младший разряд кода;
- T = от 1 до 11 мкс;
- $t_1 > 0,45$ мкс;
- $t_2 < 0,4$ мкс;
- t_3 = от 12 до 35 мкс.

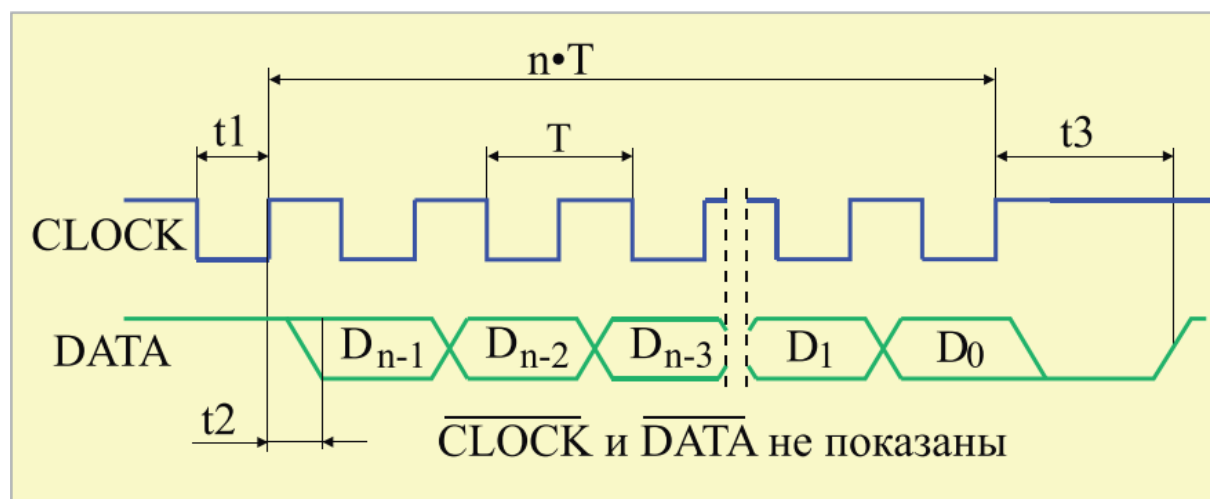


Рисунок 23 – Последовательный способ выдачи SSI без сигнала ALARM

В исходном состоянии шины CLOCK и DATA находятся в состоянии логической «1». По первому отрицательному фронту сигнала CLOCK в буфере

преобразователя фиксируется значение кода положения вала преобразователя. По последующим положительным фронтам сигнала CLOCK производится побитная передача зафиксированного значения кода, начиная со старшего разряда. После выдачи n бит линия DATA устанавливается в состояние логического «0» и удерживается в нем в течении времени t_3 . В этот период времени зафиксированное значение кода может быть считано повторно путем перевода сигнала CLOCK в состояние логического «0» и подачи соответствующего числа импульсов. Повторение выдачи зафиксированного значения может производиться неограниченное число раз. По окончании времени t_3 линия DATA устанавливается в состояние логической «1» и преобразователь готов к выдаче текущего значения позиции. Если в процессе считывания кода состояние сигнала CLOCK не изменяется в течении времени большего максимального значения T , то преобразователь автоматически возвращается в исходное состояние [15].

Последовательный SSI с сигналом ALARM

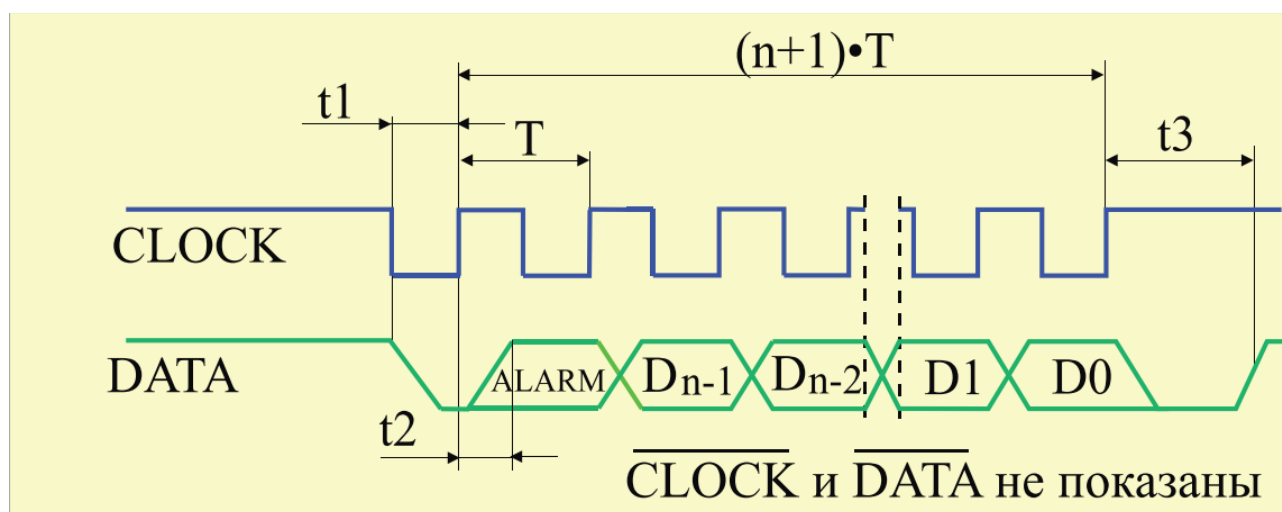


Рисунок 24 – Последовательный способ выдачи SSI с сигналом ALARM

В исходном состоянии шины CLOCK и DATA находятся в состоянии логической «1». После первого спада сигнала CLOCK шина DATA устанавливается в состояние логического «0» и в преобразователе происходит фиксация текущей позиции вала относительно его корпуса. По первому фронту сигнала CLOCK шина DATA выдает сигнал ALARM. По последующим фронтам сигнала CLOCK

производится побитная передача зафиксированного значения кода позиции преобразователя. После выдачи (n+1) бит шина DATA устанавливается в состояние логического «0» и удерживается в нем в течении времени t3. В этот промежуток времени может быть повторно считано зафиксированное значение кода позиции преобразователя путем перевода сигнала CLOCK в состояние логического «0» и подачи (n+1) импульса. Повторение выдачи запомненного значения может производиться неограниченное число раз. По окончании времени t3 линия DATA устанавливается в состояние логической «1» и преобразователь готов к выдаче текущего значения позиции. Если в процессе считывания кода состояние сигнала CLOCK не изменяется в течении времени большего t3, то преобразователь автоматически возвращается в исходное состояние [15].

2.2.5 Характеристики выбранного абсолютного энкодера.

Учитывая вышеперечисленные факторы, был выбран абсолютный энкодер ЛИР–ДА 158А, максимально разрешающая способность которого равняется 2^{17} . В таблице 3, 4 приведены технические параметры данного энкодера.

Таблица 3 – Характеристики энкодера.

Точность			
Количество разрядов ≤	± 150	Масса (без кабеля)	0,27 кг
Количество разрядов >	± 30		
Макс. скорость вращения вала.	10000 об/мин	Степень защиты	IP65
Момент трогания ротора (20 °С)	≤ 0,01 Н·м	Интервал рабочих температур	(0–70) °С – Н (-40–+85) °С – Т
Момент инерции ротора	$1,7 \cdot 10^{-6}$ кг·м ²	Вибрационные ускорения в диапазоне частот 55 – 2000 Гц.	≤ 100 м/с ²
Допустимая нагрузка на вал		Ударное ускорение (10 мс)	≤ 300 м/с ²
Осевая	≤ 10 Н	Рекомендуемые муфты	ЛИР-801
Радиальная	≤ 20 Н		ЛИР-825

Таблица 4 – Характеристики энкодера.

Тип выходного кода	Код Грея, двоичный код				
Макс. Скорость вращения вых. Вала без сбоя кода	1500 об/мин				
Способ выдачи данных	Параллельный 12 разрядов*		Параллельно- байтовый		Последовательный SSI
Напряжение питания	+5 В	+12 В +24 В	+5 В	+12 В +24 В	+5 В
Вид выходного сигнала	ТР, ОС, ОЕ	ОС, ОЕ	ТР, ОС, ОЕ	ОС, ОЕ	RS
Ток потребления, мА	≤150	≤100	≤150	≤100	≤150

3 РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Расчёт DC/DC преобразователя

На рисунке № показана схема DC/DC преобразователя на основе микросхемы MC34063.

Выводы микросхемы:

- SWC (switch collector) – коллектор выходного транзистора
- SWE (switch emitter) – эмиттер выходного транзистора
- TC (timing capacitor) – вход для подключения времяза
- GND (ground) – земля (соединяется с общим проводом понижающего DC-DC)
- FB или (CII) (comparator inverting input) — инвертирующий вход компаратора
- VCC (Voltage Collector Collector) — питание
- DRC (driver collector) – коллектор драйвера выходного транзистора

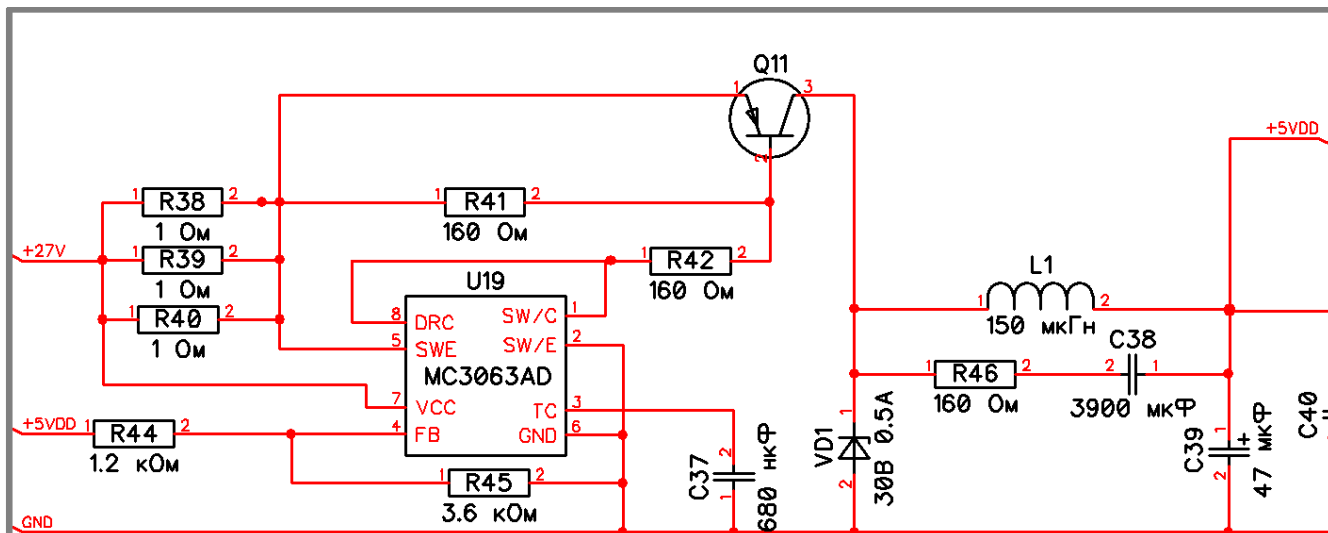


Рисунок 25 – Принципиальная схема DC/DC преобразователя

Вводные данные:

- $U_{in} = 27\text{В}$ – входное напряжение;
- $U_{out} = 5\text{В}$ – выходное напряжение;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- $I_{out} = 500\text{мА}$ – выходной ток;

Поскольку плата запитывается от аккумуляторов следует задать допустимое минимальное напряжение:

- $U_{in(\min)} = 20\text{В}$ – допускаемое входное напряжение;
- $f_{\min} = 50\text{кГц}$ – Минимальная рабочая частота.

Поскольку расчет проводится по методике AN920/D то для начала необходимо найти отношение $(t_{on} + t_{off})_{max}$,

$$(t_{on} + t_{off})_{max} = \frac{1}{f_{\min}} \quad (5)$$

$$(t_{on} + t_{off})_{max} = \frac{1}{50\text{кГц}} = 20\text{мкС}$$

где $t_{on(max)}$ – максимальное время, когда выходной транзистор открыт

$t_{off(max)}$ – максимальное время, когда выходной транзистор закрыт.

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{(U_{out} + U_F)}{(U_{in(\min)} - U_{sat} - U_{out})} \quad (6)$$

где U_F – падение напряжения на диоде (forward – прямое падение напряжения) $U_F = 0.8\text{В}$.

U_{sat} – падение напряжения на выходном транзисторе, когда он находится в полностью открытом состоянии при заданном токе $U_{sat} = 0.8\text{В}$.

Из приведённой выше формулы видно, что U_{in} , U_{out} и чем больше они отличаются друг от друга – тем меньше влияние на конечный результат оказывают U_F и U_{sat} [17].

Соответственно:

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{(5 + 0,8)}{(20 - 0,8 - 5)} = 0,408$$

Решим систему уравнений и найдем $t_{on(max)}$

$$\begin{cases} \frac{t_{on}}{t_{off}} = 0,408 \\ (t_{on} + t_{off})_{max} = 20\text{мкС} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_{on(max)} = (t_{on} + t_{off})_{max} - t_{off} \quad (8)$$

$$t_{off(max)} = \frac{(t_{on} + t_{off})_{max}}{\left(\frac{t_{on}}{t_{off}}\right)_{max} + 1} \quad (9)$$

$$t_{off(max)} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{(0,408 + 1)} = 14,2 \text{ мкс}$$

$$t_{on(max)} = (t_{on} + t_{off})_{max} - t_{off(max)}$$

$$t_{on(max)} = 20 - 14,2 = 5,8 \text{ мкс}$$

Найдём необходимую минимальную ёмкость времязадающего конденсатора C_t

$$C_t = 4.5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{on(max)} \quad (10)$$

$$C_t = 4.5 \cdot 10^{-5} \cdot 5,8 \cdot 10^{-6} = 261 \text{ (пФ)}$$

Поскольку рассчитанное значение является минимальным, то для рабочей схемы следует выбирать номинал ёмкости превышающий рассчитанный в 2 – 3 раза. Таким образом в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ был выбран $C_t = C37 = 680 \text{ пФ}$. Чем меньше ёмкость, тем больше частота. Ёмкости 680 пФ соответствует частота 14 кГц [17].

Найдём пиковый ток через выходной транзистор:

$$I_{PK(switch)} = 2 \cdot I_{out} \quad (11)$$

$$I_{PK(switch)} = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ (А)}$$

Далее необходимо определить токочувствительный резистор R_{sc} Который обычно собирают из трёх параллельно включенных резисторов R38, R39, R40. Он необходим для схемы ограничения тока. Поскольку максимальный ток выходного транзистора для MC34063 равен 1.5А, то в случае его превышения микросхема может сгореть.

$$R_{sc} = \frac{0.3}{I_{PK(switch)}} \quad (12)$$

$$R_{sc} = \frac{0.3}{1} = 0.3 \text{ (Ом)}$$

Таким образом в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ были выбраны 3 параллельно подключенных резистора (R38, R39, R40) с номиналами в 1 Ом [17].

Рассчитаем минимальную емкость конденсатора выходного фильтра C38:

$$C_{39} = \frac{I_{PK(switch)} \cdot (t_{on} + t_{off})_{max}}{8 \cdot U_{ripple}} \quad (13)$$

где U_{ripple} – максимальная величина пульсаций выходного напряжения предполагается что данная величина не превышает 50мВ.

$$C_{39} = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ (мкФ)}$$

Как говорилось ранее следует выбрать номинал ёмкости превышающий рассчитанный в 2 – 3 раза в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ был выбран $C_{39} = 220 \text{ мкФ}$ [17].

Далее рассчитаем минимальную индуктивность дросселя:

$$L_{1(min)} = t_{on(max)} \cdot \frac{(U_{in(min)} - U_{sat} - U_{out})}{I_{PK(switch)}} \quad (14)$$

$$L_{1(min)} = 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(20 - 0,8 - 5)}{1} = 82,3 \text{ (мкГн)}$$

Поскольку рассчитанное значение минимально, то следует брать номинал больше в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ был выбран $L_1 = 150 \text{ (мкГн)}$

Рассчитаем делитель напряжения (R43 и R44), данные резисторы находятся из выражения:

$$U_{out} = 1.25 \cdot \left(\frac{1+R_{44}}{R_{43}} \right) \quad (15)$$

Примем $R_{44} = 3,6 \text{ кОм}$, тогда $R_{43} = 1,2 \text{ кОм}$.

Рассчитаем сопротивления резисторов R_{41} и R_{42} ,

$$R_{41} = 10 \cdot \frac{h_{q11} \cdot 2,5}{I_{PK(\text{switch})}} \quad (16)$$

где h_{q11} – коэффициент передачи тока транзистора Q11 $h_{q11} = 40$.

$$R_{41} = 10 \cdot \frac{40 \cdot 2,5}{1} = 160 \text{ (Ом)}$$

Резистор R_{42} берём равным R_{41} , соответственно $R_{42} = 160 \text{ (Ом)}$.

Элементы снаббера (элементы R_{45} и C_{38}) для данной схемы рекомендовано выбирать равными 180 Ом и 3900 пФ соответственно [17].

Вывод: Были рассчитаны необходимые элементы цепи, а также в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ были подобраны соответствующие номиналы элементов.

3.2 Расчёт питания драйверов

Как говорилось ранее, для правильного функционирования драйвера, его следует обеспечить правильно подобранным бутстрепным конденсатором и диодом. В качестве примера возьмём драйвер U1. В начальный момент времени бутстрепный конденсатор C2 заряжается до 12 В, связь с землёй осуществляется через открытый транзистор Q6. Когда Q6 закрывается, открывается транзистор Q7, соответственно C2 со стороны силовых ключей получает потенциал равный 27 В. В итоге суммарный потенциал на узле конденсатора и резистора R1 составит 39 В. В соответствии с данными условиями были подобраны диоды D1 – D3 DL4148.

Бутстрепный конденсатор выполняет роль питания внутренней второй микросхемы драйвера, которая отвечает за переключение верхнего силового ключа. Для того что бы понять сколько требуется энергии для перезаряда силового ключа нужно рассчитать ёмкость конденсатора C2.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

Для расчета минимальной величины бутстрепного конденсатора необходимо воспользоваться следующей формулой:

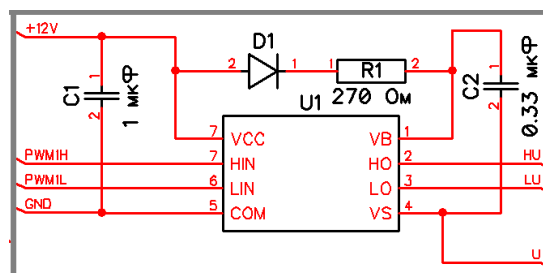


Рисунок 26 – Драйвер управления силовыми ключами

$$C_2 = \frac{2(2 \cdot Q_3 + I_{\text{пит}} \cdot T + Q_1)}{U_{VD} - U_{\text{пит}}} \quad (17)$$

где Q_3 – величина заряда затвора ключа (справочная величина $Q_3 = 63 \cdot 10^{-9}$ Кл);

$I_{\text{пит}}$ – ток потребления драйвера в статическом режиме (справочная величина $I_{\text{пит}} = 5 \cdot 10^{-3}$ А);

T – период коммутации мощных ключей ($T = 8.65 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$);

Q_1 – циклическое изменение заряда драйвера (справочная величина $Q_1 = 5$ нК);

U_{VD} – падение напряжения на бутстрепном диоде VD1 ($U_{VD} = 39$ В);

$U_{\text{пит}}$ – напряжение питания схемы драйвера ($U_{\text{пит}} = 12$ В).

$$C_2 = \frac{2(2 \cdot 63 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 8.65 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-9})}{39 - 12} = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

Вывод: таким образом, в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ были выбраны конденсаторы C2, C4, C6 в размере 0,33мкФ [11].

3.3 Расчёт номиналов силовых ключей

Переключающие схемы, кратко именуемые силовыми ключами, — необходимые элементы практически всех импульсных и цифровых устройств. В

одной из простейших реализаций ключа используется транзисторный каскад с общим эмиттером (ОЭ).

По мере увеличения управляющего напряжения обеспечивается базовый ток, достаточный для насыщения транзистора. Транзистор оказывается в режиме насыщения, то есть, открыт. Имеем состояние ключа: включено. Напряжение коллектор- эмиттер в режиме насыщения ($U_{кн}$) очень мало (как и положено для замкнутого ключа). В случае германиевых транзисторов можно считать $U_{кн} \approx 0,4$ В.

$I_{кн}$ — ток коллектора насыщения, определяется сопротивлением $R_к$ в цепи коллектора и напряжением источника питания $E_к$ на выходе, $U_{кн} = 4$ В (рисунок №).

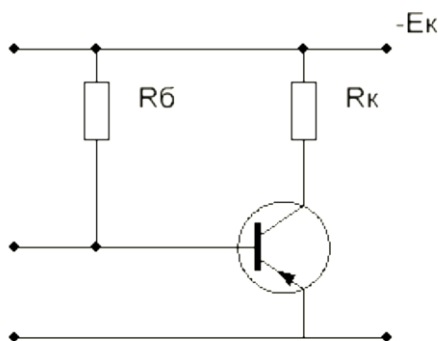


Рисунок 27 – Схема транзистора с сопротивлениями коллектора и базы

$$I_{кн} = \frac{E_к - U_{пр}}{R_к} = \frac{U_{max}}{R_к} \quad (18)$$

$$I_{кн} = \frac{27 - 4}{22} = 1.045 \text{ (A)}$$

где $R_к$ – общее сопротивление цепи коллектора, которое определяется как:

$$R_к = 2 \cdot R_{\partial} = 2 \cdot \frac{U_{пр}}{I_{пр}} \quad (19)$$

$$R_к = 2 \cdot \frac{0,55}{250 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ (Ом)}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Ключевой режим характеризуется низким падением напряжения коллектор-эмиттер. Для перевода транзистора в этот режим необходимо в базу транзистора подать ток, больший чем ток насыщения базы $I_{бн}$:

$$I_{бн} = \frac{I_{кн}}{\beta} \quad (20)$$

$$I_{бн} = \frac{1.045}{10} = 0.1045 \text{ (А)}$$

где β – статический коэффициент передачи тока

Ток насыщения базы задаётся с помощью резистора с сопротивлением $R_{бн}$, равным:

$$R_{бн} = \frac{E_k - U_{бэ0}}{I_{бн}} \quad (21)$$

$$\frac{27 - 0,6}{0.1045} \approx 253 \text{ (Ом)}$$

где $U_{бэ0}$ – пороговое напряжение перехода база-эмиттер. Для германиевых транзисторов $U_{бэ0} = 0,6 \text{ В}$.

Выбираем согласно ГОСТ 28884-90, резистор из ряда E24 с допуском $\pm 1\%$ с номинальным значением $R_{бн} = 0.27 \text{ кОм}$, соответственно на схеме резисторы R7 – R12 принимаем равными $R_{бн}$. Исходя из выше перечисленного становится ясным что резисторы R1 – R3 принимают такие же значения что и $R_{бн}$.

Сопротивление эмиттера в режиме насыщения описывается следующим выражением:

$$R_э = \frac{E_k}{I_{кн}} - R_k \quad (22)$$

$$R_э = \frac{27}{1.045} - 22 = 3.84 \text{ (Ом)}$$

Ток насыщения базы определяется из выражения:

$$I_{\text{бн}} = \frac{K_{\text{н}}}{\beta} \cdot I_{\text{кн}} \quad (23)$$

$$I_{\text{бн}} = \frac{1,5}{10} \cdot 1.045 = 157 \text{ (мА)}$$

где $K_{\text{н}} = 1,2 \div 2$ – коэффициент насыщения

Напряжение на базе $U_{\text{б}}$ равно:

$$U_{\text{б}} = E_{\text{к}} \cdot \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{к}}} + U_{\text{бэ0}} \quad (24)$$

$$U_{\text{б}} = 27 \cdot \frac{3.84}{3.84 + 22} + 0,6 \approx 4,61 \text{ (В)}$$

Для защиты транзисторов от перенапряжений, наведенных внешними источниками и возникающих в цепях питания, целесообразно использование быстродействующих диодов, стабилитронов или специальных полупроводниковых ограничителей напряжения, включаемых между коллектором и эмиттером

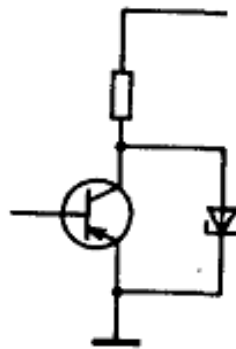


Рисунок 28 – Схема включения защитного стабилитрона

Выбирается стабилитрон по напряжению стабилизации, которое должно граничить с предельно допустимым напряжением коллектор-эмиттер транзистора и по предельно допустимому значению тока стабилизации.

В данной работе был выбран MOSFET транзистор IRFR5305PBF, который уже включает в себя данный стабилитрон и соответствует рассчитанном параметрам [11].

Для формирования импульсных сигналов в транзистор, в схеме к коллектору транзистора подключается конденсатор. Для количественной оценки коммутационных параметров можно воспользоваться следующими выражениями:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{гр}} \quad (25)$$

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40} = 0,004$$

где $f_{гр}$ – граничная частота коэффициента передачи тока;

Тогда ёмкость конденсатора в цепи эмиттера транзистора вычисляется:

$$C_u = \frac{\tau}{R_k} \quad (27)$$

$$C_u = \frac{0,004}{22} = 18.18 \text{ (мкФ)}$$

Из ряда емкостей, согласно ГОСТ 28884-90, выбирается ёмкость $C_u = 20$ мкФ, соответственно на схеме конденсаторы С9 – С11 равны C_u

Вывод: выбранный MOSFET транзистор IRFR5305PBF, удовлетворяет рассчитанным условиям, так же рассчитаны элементы R7 – R12, R1 – R3 и С9 – С11 [10].

3.3.1 Расчёт теплового режима силовых ключей

Проверка теплового режима производится по максимально допустимой мощности потерь, которая имеет место в режиме насыщения транзистора. Типовой расчет потерь ключа основан на типовых формах токов и напряжений. Реальные кривые имеют отличительные особенности, связанные с переходными процессами и действием паразитных элементов схемы. Проведём грубый расчёт, который подразумевает работу транзистора при нормальных условиях.

$$P_{тр} = I_{сток} \cdot U_{кн} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (28)$$

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

$$P_{\text{тр}} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot \left(1 + \frac{1}{10}\right) = 0,0011 \text{ (Вт)}$$

Проверим полученные результаты с документацией транзистора.

Из всего перечисленного стоит обратить внимание на показатели $R\theta_{JC} = \frac{1,4\text{K}}{\text{Вт}}$, $R\theta_{J\text{Арсб}} = \frac{50\text{K}}{\text{Вт}}$, $R\theta_{JA} = \frac{110\text{K}}{\text{Вт}}$. $R\theta_{JA}$ – означает, что при выделяемой мощности 1 Вт, разница температур между внешней средой и переходом составит 110 градусов. Внутреннее сопротивление транзистора $R_{\text{внут}} = 0,5 \text{ Ом}$

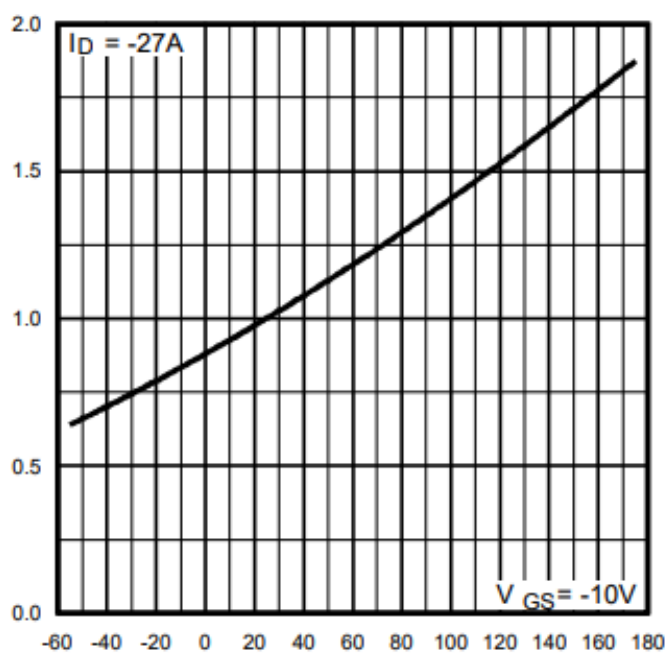


Рисунок 29 – Зависимость внутреннего сопротивления транзистора от температуры

Исходя из выше представленного графика, можно понять, что при температуре близкой к 20 градусам С°, внутреннее сопротивление транзистора, не изменяется соответственно:

$$R_{\text{внут}} = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ (Ом)}$$

Рассчитаем рассеиваемую мощность:

$$P_{\text{тр}} = I_{\text{бн}}^2 \cdot R_{\text{внут}} \quad (29)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$P_{\text{тр}} = (157 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \approx 0,012 \text{ (Вт)}$$

Рассмотрим неблагоприятные условия работы:

При температуре близкой к 90 градусам С° внутреннее сопротивление транзистора, увеличивается в 2,08 раз, соответственно:

$$R_{\text{внут}} = 2,08 \cdot 0,5 = 1,04 \text{ (Ом)}$$

Рассчитаем рассеиваемую мощность:

$$P_{\text{тр}} = (157 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,04 \approx 0,026 \text{ (Вт)}$$

Вывод: выбранный MOSFET транзистор удовлетворяет условию текущей работы, а также способен работать без применения радиатора даже при относительно высоких температурах [9].

3.4 Расчёт токоограничивающих резисторов для светодиодов

В общем случае расчет сопротивления резистора для светодиодов производится по закону Ома. Зная напряжение и ток, можно определить величину сопротивления участка цепи.

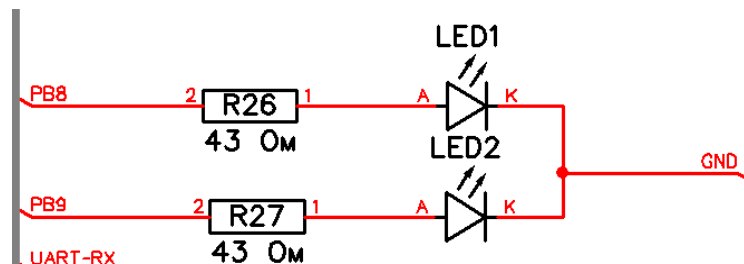


Рисунок 30 – Светодиоды сигнализаторы

Напряжение на ножках PB8 и PB9 микроконтроллера колеблется в районе 3В ($U_{\text{пит}} = 3\text{В}$), Прямое напряжение светодиодов, КРА-3010SGC и КРА-3010SURC составляет 2,2В ($U_{\text{св}} = 2,2\text{В}$), прямой ток светодиодов 20мА ($I_{\text{св}} = 20\text{мА}$).

По закону Ома:

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{пит}} - U_{\text{св}}}{I_{\text{св}}} \quad (30)$$

$$R_{\text{огр}} = \frac{3 - 2,2}{0,02} = 40 \text{ (Ом)}$$

Найдём мощность токоограничивающего резистора:

$$P_R = I_{\text{св}}^2 \cdot R_{\text{огр}} \quad (31)$$

$$P_R = 0,02^2 \cdot 40 = 0,016 \text{ (Вт)}$$

Вывод: Были рассчитаны токоограничивающие резисторы цепи, а также в соответствии с ГОСТ 28884-90 и рядом E24 с допуском $\pm 1\%$ были подобраны соответствующие номиналы элементов.

3.5 Расчёт стоимости одной платы

Расчёт проводился в условиях розничной покупки каждого элемента в магазинах «Чип и Дип». Исходя из перечня элементов и их стоимости приведенных в перечне элементов в приложении В, можно сделать вывод, что общая стоимость всех элементов составляет 2998,6 руб. (Две тысячи девятьсот девяносто восемь рублей 60 копеек).

Себестоимость производства печатной платы с толщиной 1.6 мм составляет 191,1 руб. (Сто девяносто один рубль 10 копеек).

Исходя из выше перечисленного, можно подсчитать итоговую стоимость платы управления:

$$\text{стоимость} = 2998,6 + 191,1 = 3189,7 \text{ руб.}$$

Три тысячи сто восемьдесят девять рублей 70 копеек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Разработана плата управления, выполнен расчет номиналов, в соответствие с ГОСТ 28884-90, произведён подбор необходимых радиоэлементов. Был проведён экономический расчёт.

По результатам выпускной квалификационной работы, была изготовлена и предоставлена схемотехническая карта и печатная плата. Можно с уверенностью сказать, что представленная модель управления является оптимальной на сегодняшний день и отвечает всем заявленным требованиям надёжности, экономичности и простоты использования.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

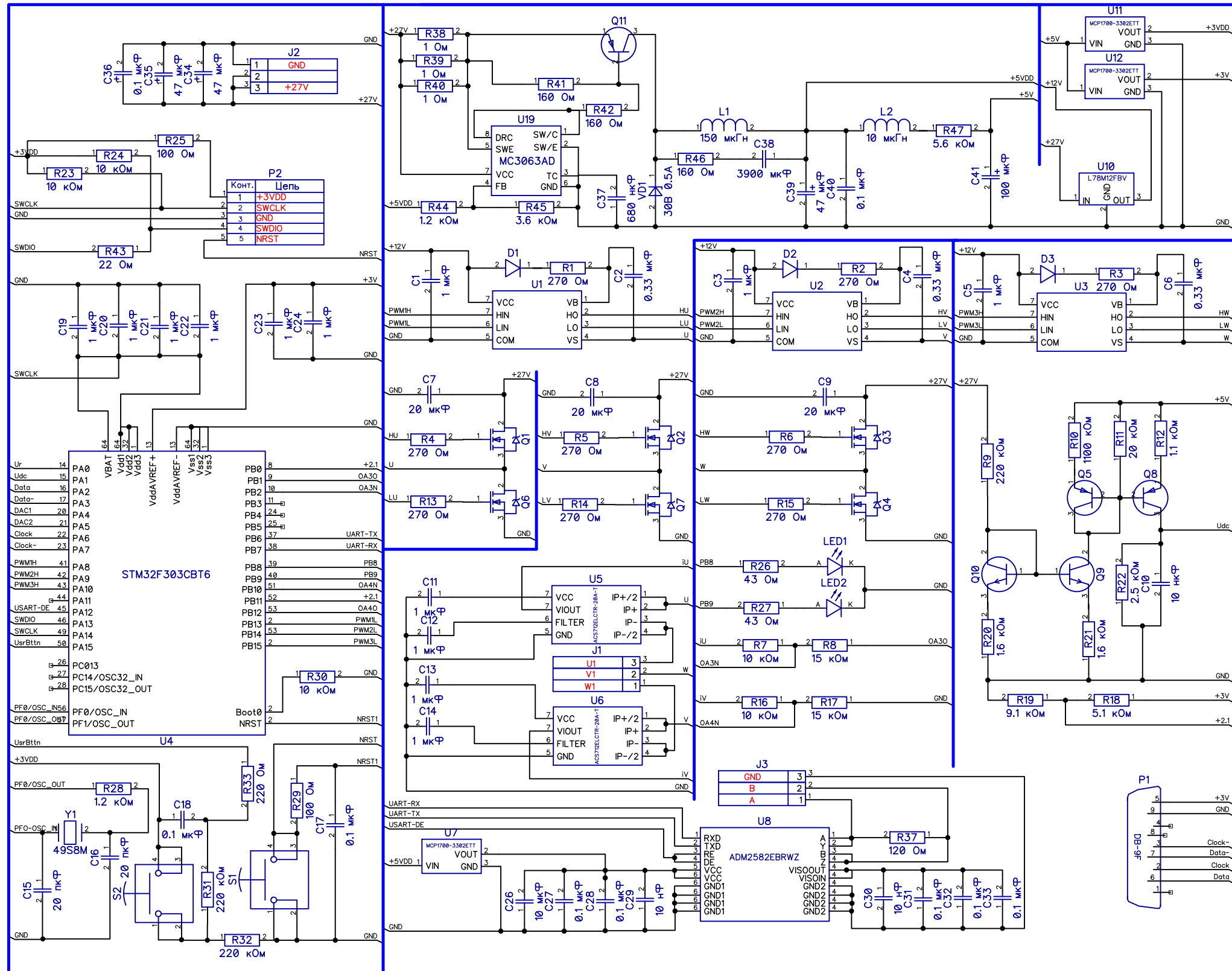
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ленденева Н.Ф. Механика. Детали машин: учеб. пособие для курсантов и студентов ФБФО/ Н.Ф. Ленденева. – Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА, 2005. – 127с.
2. Чесалин А.Д. Технология. Технология производства электрических изделий: учеб. пособие/. – А. Д. Чесалин, П.Р. Баранов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 60 с.
3. Шумилов И.С. Системы управления рулями самолётов: учеб. пособие/ И. С. Шумилов. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 469 с.
4. Мотиенко Т.А. Прикладной метод синергетического синтеза иерархических систем управления летательными аппаратами: автореферат/ Т.А. Мотиенко – Таганрог: Изд-во ТТИЮФУ, 2011. – 20 с.
5. Давыдов И.Е. Исследование характеристик электрогидравлической рулевой машины: методические указания/ И.Е. Давыдов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – 22 с.
6. Галлямов Ш.Р. Улучшение динамических характеристик рулевого привода летательного аппарата на основе имитационного моделирования/ Ш.Р. Галлямов. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2009. – 18 с.
7. Копылов И.П. Проектирование электрических машин/ И.П. Копылов. – М.: Изд-воЮРАЙТ, 2011. – 22 с.
8. Полуянович Н.К. Силовая электроника/ Н.К. Полуянович Н.К. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 204.
9. Гейтеинко Е.Н. Источники вторичного электропитания схемотехника и расчёт/ Е.Н. Гейтеинко. – М.: Изд-во СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с.
10. Профессор К.А. Основы электроники/ К.А. Профессор. – М.: Изд-во Государственное энергетическое издательство, 1946. – 320 с.
11. Николаенко М.Н. Самоучитель по радиоэлектронике/ М.Н. Николаенко. – М.: Изд-во NT Press, 2006. – 92 с.

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

12. Министерство образования и науки российской федерации. Космическое приборостроения/ Министерство образования и науки российской федерации – Томск: Изд-во ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014. – 375 с.
13. Астафьев Е.А. Выбор электромеханических узлов и моделирование переходных процессов электропривода рулевой машины/ Е.А. Астафьев – Челябинск.: Изд-во ЮУрГУ, 2018. – 70 с
14. Филипенко Д.А. Разработка программного обеспечения микропроцессорной системы управления электроприводом рулевой машины/ Д.А. Филипенко – Челябинск.: Изд-во ЮУрГУ, 2018. – 80 с
15. Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла – <http://ru.avangard.org/content/files/ПФ-ДЭ-16-100.pdf>
16. Моделирующая программа Jigrein – <http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/contents.htm>
17. Расчёт понижающего преобразователя (STEP-DOWN BUCK), DC-DC на микросхеме MC34063 – https://electrooblog.wordpress.com/2016/08/12/три-богатыря-импульсные-преобразова/#_Точ458776242
18. Datasheet STM32F303CBT6 – http://www.datasheetlib.com/datasheet/328413/stm32f303cbt6_stmicroelectronics.html

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Взамен инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл.

ЮУрГУ - 13.03.02. 2018 178. 10 ПЗ

Изм Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Федорченко А.С.		
Пров.	Воронин С.Г.		
Н. контр.	Шабуров П.О.		
Утв.	Дегтярь В.Г.		

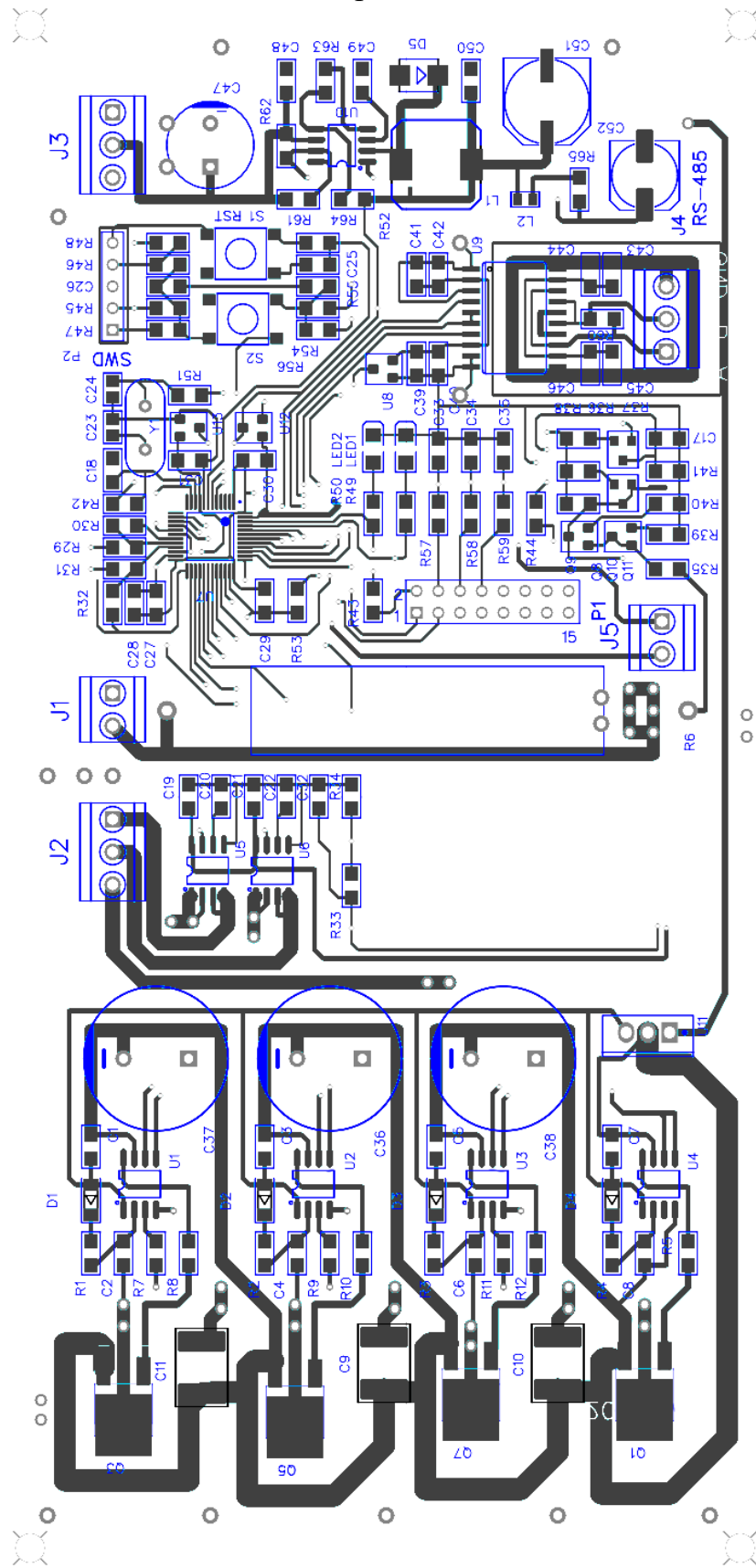
**Плата управления
электроприводом
поворота
сопла ракеты**

Лит.	Масса	Масшт.	
Д		1:1	
Лист 75		Листов 82	

**ЮУрГУ
кафедра ЛА**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сторона А



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

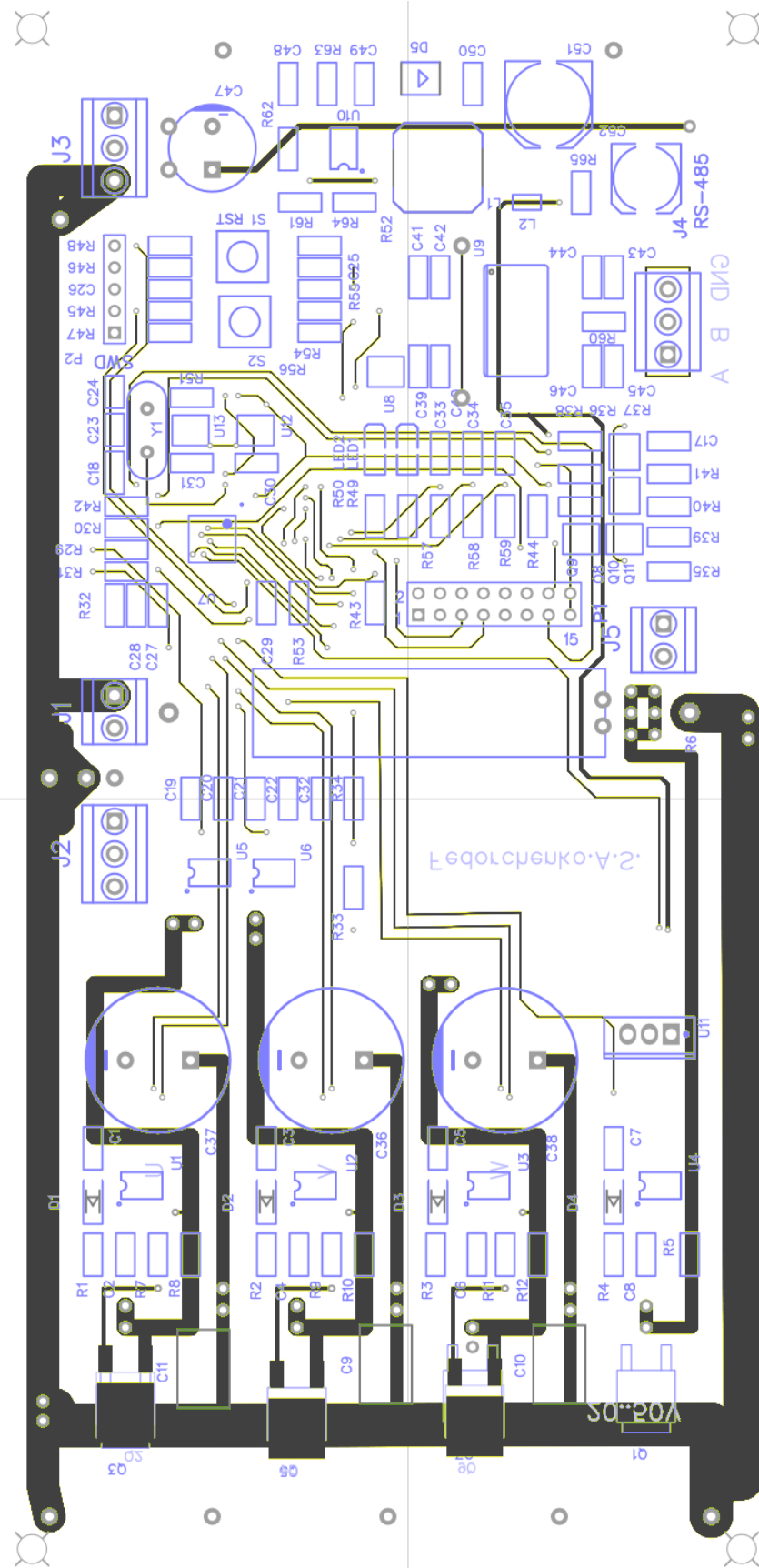
ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ

Лист

76

ПРИЛОЖЕНИЕ Б продолжение

Сторона Б



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ

Лист

77

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Зона	Поз.	Наименование	Розничная цена	Кол.	Примеч.
		КОНДЕНСАТОРЫ			
1	C1	Y5V 1206 SMD	5 руб.	1	1 мкФ 50В
2	C2	H5V 1206 SMD	4 руб.	1	0.33мкФ 50В
3	C3	Y5V 1206 SMD	5 руб.	1	1 мкФ 50В
4	C4	H5V 1206 SMD	4 руб.	1	0.33мкФ 50В
5	C5	Y5V 1206 SMD	5 руб.	1	1 мкФ 50В
6	C6	H5V 1206 SMD	4 руб.	1	0.33мкФ 50В
7	C7-C9	ECAP SMD B41121A7226M000	6 руб.	3	20 мкФ 100В
8	C10	X7R 1206 SMD	4 руб.	1	0.01мкФ 50В
9	C11-C14	Y5V 1206 SMD	5 руб.	4	1 мкФ 50В
10	C15-C16	NPO 0805 SMD	0.9 руб.	2	20 пФ 50В
11	C17-C18	GRM319F51H104Z 1206 SMD	4 руб.	2	0.1 мкФ 50В
12	C19-C24	Y5V 1206 SMD	5 руб.	6	1 мкФ 50В
13	C25	GRM31MR61A106K 1206 SMD	12 руб.	1	10 мкФ 10В
14	C26-C27	GRM319F51H104Z 1206 SMD	4 руб.	2	0.1 мкФ 50В
15	C28-C30	GRM31MR61A106K 1206 SMD	12 руб.	3	10 мкФ 10В
16	C31-C32	GRM319F51H104Z 1206 SMD	4 руб.	2	0.1 мкФ 50В
17	C33	GRM31MR61A106K 1206 SMD	12 руб.	1	10 мкФ 10В
18	C34-C35	ECAP K50-35	4 руб.	2	47 мкФ 35В
19	C36	ECAP K50-35	5 руб.	1	0.1 мкФ 50В
20	C37	GRM31BR73A681KW01L X7R 1206 SMD	2,6 руб.	1	680 пФ 1кВ
21	C38	GRM1887U1H392JA01D 0603 SMD	1,4 руб.	1	3.9 нФ 50В
22	C39	ECAP SMD B41121A3227M000 1206 SMD	1,4 руб.	1	220 мкФ 10В

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 178.10 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Федорченко А.С.</i>			Плата управления электроприводом поворота сопла ракеты	Лит.	Лист	Листов
<i>Провер.</i>		<i>Воронин С.Г.</i>					1	4
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шабуров П.О.</i>				ЮУрГУ кафедра ЛА		
<i>Утверд.</i>		<i>Десятьев В.Г.</i>						

Зона	Поз.	Наименование		Кол.	Примеч.
71	U8	ADM2582EBRWZ, Приемопередатчик RS-485	760 руб.	1	
72	U9	MC33063ADE4, DC-DC преобразователь	25 руб.	1	1.5А 3-40В
73	U10	L78M12ABV, Прецизионный регулятор напряжения	18 руб.	1	500мкА 12В
74	U11-U12	MCP1700T-3302E/TT Регулятор напряжения	33 руб.	2	1.6мкА 1.2-5В
ИНДУКТИВНОСТЬ					
75	L1	B82477G4154M SMD	75 руб.	1	150 мкГн 1.42А
76	L2	LQM21FN100N SMD 0805	6 руб.	2	10 мкГн 0.42А
РЕЗОНАТОРЫ					
77	Y1	8.000MHzHC-49US	15 руб.	1	
ТАКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ					
78	S1-S2	7914G-1-000E Тактовый переключатель	52 руб.	2	
КЛЕМНИКИ					
79	J1-J3	KLS2-128I-5.00-03P-4S	12 руб.	3	3 контакта
ВИЛКИ					
80	P1	PLS-40 (DS1021-1x40)	15 руб.	1	5 контактов
81	P2	PLD-16 (DS1021-2x8)	8 руб.	1	16 контактов
82	P3	DB-9F (DS1033-09F)	11	1	9 контактов