

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно–Уральский государственный университет
(национальный исследовательский институт)»

Факультет «Аэрокосмический»

Кафедра «Летательные аппараты»

Направление 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент, должность и место работы

Зам. заведующего кафедрой,
к.т.н., доцент

_____/_____/

/ Федоров В.Б./

« ____ » _____ 2020 г.

« ____ » _____ 2020 г.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ
ПЛАТФОРМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ОСИ ТАНГАЖА
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

ЮУрГУ – 13.04.02 2020 143.01 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР, к.т.н, доцент

_____/А.И. Согрин/

« ____ » _____ 2020г.

Автор работы:

Студент группы П – 234

_____/Д.З. Ахмедзянов/

« ____ » _____ 2020г.

АННОТАЦИЯ

Ахмедзянов Д.З. Система управления гиросtabilизированной платформы космического аппарата по оси тангажа – Челябинск: ЮУрГУ, П-234, 84 стр., 36 илл., 13 табл., библиогр. список – 20 наим

В данной работе были рассмотрены задачи поворота камеры космического аппарата в космосе. При проектировании был разработан и предложен электродвигатель, оптимизирующий электропривод, путем замены предложенных электродвигателей на спроектированный.

Также был ознакомлен материал, изложенный в отечественной и зарубежной литературе по данной теме, спроектирован двигатель для поворота камеры, также были проведены соответствующие расчеты.

Рассчитана возможная мощность электродвигателя, и передаточное число для редуктора, все расчеты были просмотрены в режиме симуляции в программном обеспечении.

Тема данной работы на сегодняшний день остается актуальной для ракетостроения, так как уменьшение массогабаритных размеров и повышение КПД, простота конструкции положительно сказывается на всей системе космического аппарата в целом. Также появляется возможность серийного производства данного устройства.

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Ахмедзянов			<i>Система управления гиросtabilизированной платформы космического аппарата по оси тангажа. Пояснительная записка к ВКР</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Согрин А.И					5	88
<i>Н. Контр.</i>		Шабуров П.О.				ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»		
<i>Утверд.</i>		Фёдоров В.Б.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ЗАДАНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ	11
2 ОРГАНИЗАЦИЯ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА КА.....	12
2.1 Виды механических передач	12
2.1.1 Зубчатые передачи.....	13
2.1.2 Червячные передачи	14
2.1.3 Планетарные передачи	15
2.1.4 Волновые механические передачи.....	16
2.1.5 Фрикционные передачи.....	17
2.1.6 Передача винт-гайка (шариковая передача)	17
2.2 Рулевые машины принципы и требования	19
2.2.1 Гидравлические рулевые машины	19
2.2.2 Электрогидравлические рулевые машины.....	21
2.2.3 Электрические рулевые машины	23
2.2.4 Требования к динамике рулевого привода как исполнительного элемента системы стабилизации.....	27
2.3 Вывод	30
3 РАСЧЕТ РЕДУКТОРА И ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ	31
3.1 Моменты электропривода.....	32
3.2 Приведение сил и моментов	34
3.3 Приведение инерционных масс электропривода	36
3.4 Предварительный расчет параметров двигателя.....	37
3.5 Расчет передаточного числа редуктора и параметров двигателя	38
3.6 Выбор двигателя	41
4 РАЗРАБОТКА Электродвигателя.....	44
4.1 Расчет параметров электродвигателя	44
4.1.1 Размеры	45
4.1.2 Магнитная цепь	48
4.1.3 Расчет витков.....	52
4.1.4 Масса электродвигателя	54

4.1.5 Сравнение выбранного двигателя и расчетного	55
4.2 Моделирование двигателя	55
5 ВЫБОР ДАТЧИКА	67
5.1 Датчики Холла	67
5.1.1 Интегральные датчики Холла.....	69
5.1.2 Основные характеристики датчиков Холла.....	72
5.2 Индукционный датчик	73
5.3 Выбранный тип датчика	75
6 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ	77
7 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	84
ПРИЛОЖЕНИЕ А	86
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ В	91

ВВЕДЕНИЕ

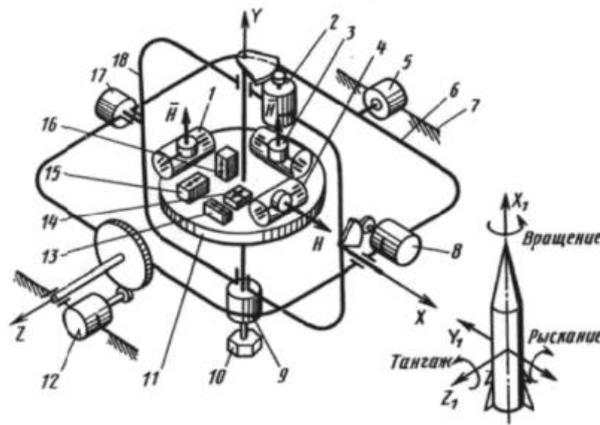
Гиросtabilизированная платформа представляет собой платформу для пространственной стабилизации устройств или приборов КА, имеющую ряд двигателей разного назначения от маховиков до камер ориентации в космосе. Сама платформа имеет стабилизацию по трем осям, что позволяет работать камерам без возможных колебаний в космосе.

Электропривод в такой платформе не является силовым и предназначен для навесного оборудования где необходимо использовать средства ориентации, например, камеры, оптические датчики, маховики, датчики угловых скоростей и так далее.

Электродвигатели имеют бурное развитие на сегодняшний день. Используют прорывные технологии в автомобилестроении, космической и промышленной отраслях. Его простота конструкции и повсеместная применяемость делает данное устройство просто незаменимым.

Разрабатываемые платформы для КА бывают самых разных типов и конструкций. Различают платформы по массе, по типу конструкций, предназначенных для определенных типов КА, по количеству осей у платформы, по количеству устанавливаемых приводных модулей.

Электропривод оборудования гиросtabilизированной платформы- это целая система, состоящая из электродвигателя, системы управления, также могут использовать редукторные системы. Двигатели разрабатывают в конструкторском бюро или выбирают готовые двигатели исходя из технического задания.



Принципиальная схема трехосной гиросtabilизированной платформы в кардановом подвесе:

- 1 – гироблок рысканья; 2 – стабилизирующий двигатель **оси** вращения;
- 3 – гироблок **тангажа**; 4 – гироблок вращения;
- 5 – датчик угла поворота ГСП относительно **оси тангажа**;
- 6 – наружная рама карданового подвеса ГСП; 7 – корпус;
- 8 – стабилизирующий двигатель **оси** рысканья;
- 9 – датчик угла поворота относительно **оси** вращения;
- 10 – многогранная призма **оси** рысканья; 11 – стабилизируемая платформа;
- 12 – стабилизирующий двигатель **оси тангажа**; 13 – акселерометр **оси X**;
- 14 – двухкоординатный датчик горизонта; 15 – акселерометр **оси Z**;
- 16 – акселерометр **оси Y**;
- 17 – датчик угла поворота ГСП относительно **оси** рысканья;
- 18 – внутренняя рама карданового подвеса

Рисунок 1 – Принципиальная схема гиросtabilизированной платформы

Развитие систем ориентации в космосе не стоит на месте. Очень много концептов воплощаются в реальность.

Целью выпускной квалификационной работы, является оптимизация электропривода гиросtabilизированной платформы для камеры навигации по оси тангажа за счёт разработки оптимальной схемы и моделирования электродвигателя, что позволит уменьшить массогабаритные размеры и увеличить производительность, срок службы электропривода. Данное техническое решение позволит использовать электропривод в широкой области ракетостроения в частности для навигации.

В соответствие с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

Аналитические задачи

1 Изучить научную литературу о принципах действия и устройства управления положением камеры навигации в космическом пространстве,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

принципы моделирования электродвигателя, основы проектирования электропривода КА.

2 Провести анализ возможных вариантов модернизации и оптимизации электропривода для управления поворотом навигационного устройства космического аппарата.

Проектные задачи

- 1 Выбрать тип и определить структуру электропривода.
2. Разработать функциональную схему электропривода
3. Произвести расчет для передаточного числа редуктора
4. Разработать электродвигатель для электропривода
5. Построить математическую модель электродвигателя для верификации и коррекции результатов проектирования
6. Построить математическую модель разработанного электропривода, позволяющую произвести выбор и настройку регуляторов.

Предмет исследования – электропривод летательных аппаратов.

Объект исследования – электродвигатель гиросtabilизированной платформы по оси тангажа КА.

Степень разработанности в литературе – при создании системы управления КА, вопрос уменьшения массогабаритных размеров ставился неоднократно и всегда являлся решающим при проектировании готового решения электропривода. Но конкретного технического решения, дающего возможность снизить вышеперечисленные показатели, данные решения приводят только к подбору двигателя по уже существующим паспортным данным заводских производителей.

Научная новизна – заключается в снижении массогабаритных размеров электродвигателя, с помощью моделирования его в специальных программах. Представленное техническое решение позволит использовать разработанный электродвигатель в широком диапазоне задач, связанных с навигацией. Кроме того, станет возможным серийное производство данного технического узла.

Данное исследование станет практичным не только для образовательных целей, но и для научной и оборонной деятельности.

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1 ЗАДАНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Решение проблемы поворота стабилизированной платформы КА. Предоставить полный вариант исполнения управления рабочим органом. В качестве рабочего органа выступает звездный датчик в виде камеры навигации КА. Все необходимые параметры системы приведены, в таблице 1.

При проектировании решаются задачи представленные ниже:

- Рассчитать требуемую мощность электродвигателя;
- Исходя из условий выбрать тип электродвигателя
- Рассчитать необходимое передаточное число редуктора;
- Провести анализ технической литературы и выбрать соответствующую механическую передачу;
- Рассчитать параметры электродвигателя с выбором материалов для него
- Разработать модель электродвигателя в ПО Ansys Electronics Desktop;
- Провести анализ технической литературы и выбрать датчика угла рабочего органа;
- Привести математический расчёт датчика;
- Привести готовую модель датчика в ПО Ansys Electronics Desktop
- Произвести экономический расчёт

Таблица 1 – Задание для выпускной квалификационной работы

Параметр	Значение параметра
Масса камеры, кг	2
Радиус камеры, м	0.1
Питающее напряжение КА, В	24
Угол поворота камеры, рад	3.14
Время поворота, с	0.5

2 ОРГАНИЗАЦИЯ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА КА

Для управления рабочего органа установленным непосредственно на КА используют устройства, включающие в свою конструкцию плату управления и двигатель в связке с редуктором, либо только двигатель с оборудованием управления, только если требования эксплуатации позволяют специалистам применять данную концепцию.

В космической отрасли массо-габаритные параметры являются образующими. Поэтому часто, конструкторы выбирают электродвигатели с высокой скоростью, точностью и малым моментом на валу. С помощью редуктора, можно получить больший момент, но низкую скорость. Но стоит помнить, что механический преобразователь момента также имеет собственные массо-габаритные параметры.

Поэтому для того, чтобы обосновать, выбор оптимального для космического аппарата важно понимать все варианты исполнения конструкции редукторов, их предполагаемые размеры и массу.

2.1 Виды механических передач

Механической передачей называют устройство для изменения передачи механического движения от электродвигателя к непосредственно рабочим устройствам машины. Осуществляется благодаря изменению значений и направлению скорости движения, с преобразователем движения. Необходимость эксплуатации таких устройств обусловлена нецелесообразностью, а иногда и невозможностью непосредственного соединения рабочего органа машины с валом двигателя. Устройства вращательного движения позволяют осуществить непрерывное и равномерное движение с минимальными затратами механической энергии на преодоление трения и наименьшими инерционными нагрузками.

Механические передачи вращательного движения подразделяются:

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

- по способу передачи движения от ведущего звена к ведомому на передачи с помощью трения (фрикционные, ременные) и зацеплением (цепные, зубчатые, червячные);
- 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, пересекающимися и перекрещивающимися осями валов.

2.1.1 Зубчатые передачи

Зубчатая передача – это механизм или часть механизма механической передачи, в состав которого входят зубчатые колёса. При этом усилие от одного элемента к другому передаётся с помощью зубьев.

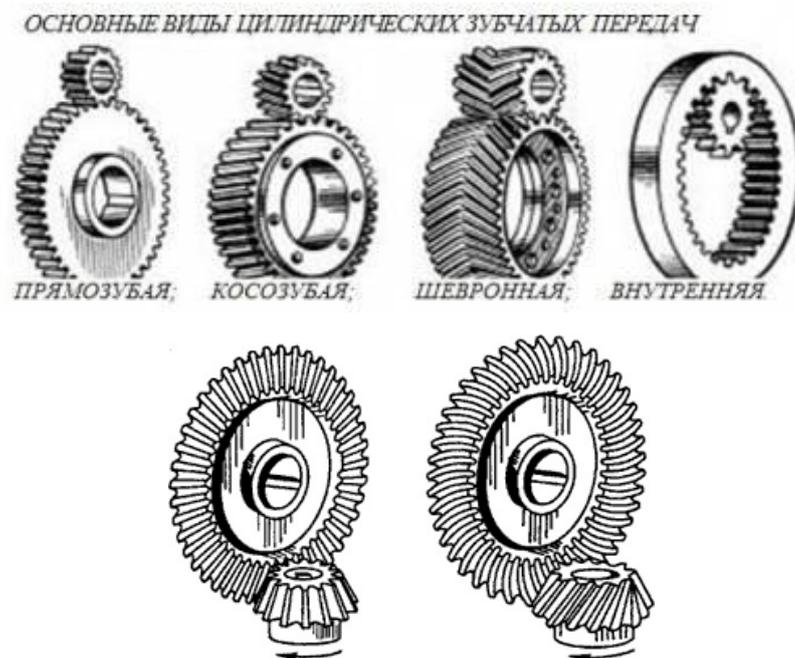


Рисунок 2 – Основные виды Зубчатых передач

К достоинствам зубчатых передач относятся:

- Постоянное поддержания значений передаточного числа (звенья не проскальзывают);

- компактность (по сравнению с ременными и фрикционными передачами);
- высокий КПД (в одной ступени может достигать до 98%);
- высокая ресурсность;
- возможность их передавать большие мощности (до десятков тысяч кВт) и скоростей (до 150 м/с).

Недостатки зубчатых передач:

- шум во время работы на высоких скоростях;
- жесткость передачи;
- высокие требования точности изготовления, сборки и монтажа;
- незащищенность от возможных перегрузок;
- необходимость в смазке;

образующиеся вибрации, возникают в результате недостаточно точного изготовления и (или) неточной сборки передач.

2.1.2 Червячные передачи

Червячная механическая – это передача вид механической передачи, применяемые для передачи движения между перекрещивающимися осями, угол между которыми, как правило, составляет 90° . Движение в червячных передачах передается по принципу винтовой пары. Одна из частоиспользуемых червячных передач (рисунок 3) состоит из винта с трапецеидальной резьбой и зубчатого или червячного колеса

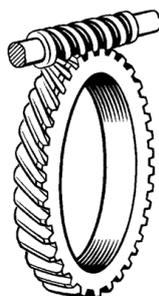


Рисунок 3 – Червячная передача

Червячные колеса различают по следующим признакам: по форме поверхности, на которой образуется резьба, – цилиндрические и глобоидные.

Отдельно подразделяют цилиндрические червяки по форме профиля: архимедов червяк, конволютный, эвольвентный, а также с вогнутым профилем.

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

2.1.3 Планетарные передачи

Планетарная передача – вид механической передачи, содержащая зубчатые колеса с перемещением осей. Состоит из центрального зубчатого колеса, зубчатых колес сателлитов, колеса с внутренними зубьями. Зависимые зубчатые звенья перемещаются вместе с центральной осью данной передачи, также как в системе притяжений планет.

Достоинства планетарных передач:

- Небольшие массо-габаритные размеры;
- точность механической передачи;
- возможность использования больших передаточных отношений
- возможность конструктивного исполнения данного механизма в герметизированном пространстве;

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

К недостаткам планетарных передач относятся высокие требования к точности изготовления при использовании дорогих материалов и сборки конструкции, а также высокие потери на трение, ограничение скорости ведущего вала, что существенно ограничивает его область применения планетарных механических передач.

- высокие потери на трение;
- использования дорогих материалов при конструировании.

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.

2.1.5 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 цепях приборов, где требуется бесшумность работы, плавность движения, безударное включение на ходу и т.п. Например, часто фрикционные передачи можно встретить в автомобилестроении.

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.

2.1.6 Передача винт-гайка (шариковая передача)

Шарико-винтовая передача (ШВП) – это линейный механический привод, преобразующее вращение в линейное перемещение и наоборот. Конструктивно она представляет собой 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 не скоростные и точные перемещения.

В авиастроении данный привод 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 ресурсность;
- бесшумность и плавность работы;
- точность;
- 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 [1].

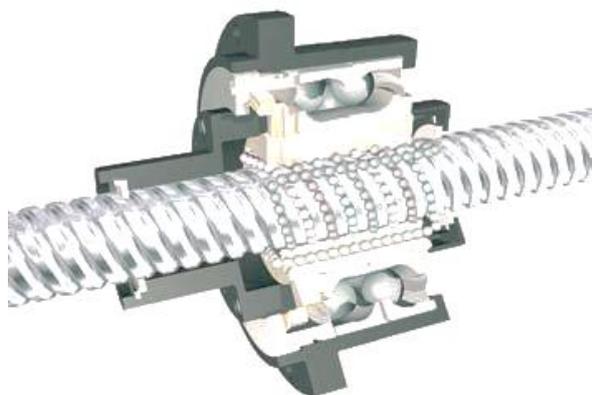


Рисунок 5 – Шарико-винтовая передача

2.2 Рулевые машины принципы и требования

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.

В данном разделе, 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.[2]

2.2.1 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 потока жидкости в механическую энергию, необходимую для совершения полезной работы на нагрузке [3].

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.

2.2.2 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 [3].

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.

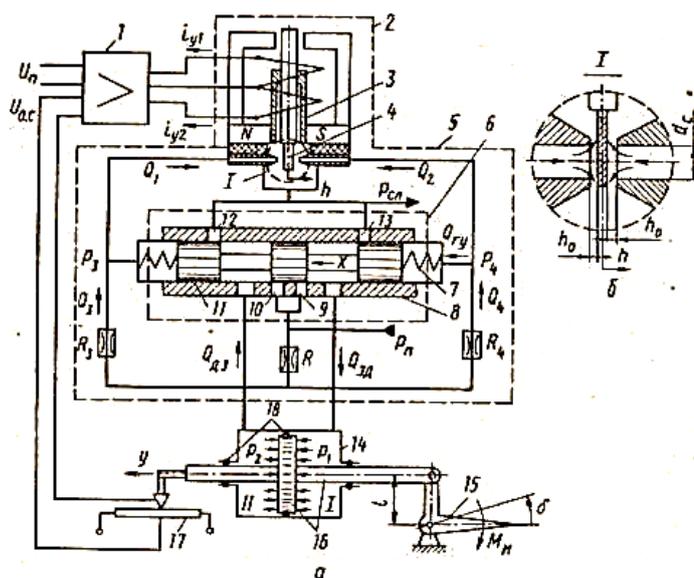


Рисунок 6 – Принципиальная схема электрогидравлического рулевого привода

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.

2.2.3 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 неметаллического материала. Указанные модификации 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 $M_{\text{н}}$, например, $\Omega = f(U_{\text{я}}, M_{\text{н}})$ (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 $\delta_{ж}$, задаваемым потенциометром-датчиком (ПД), и истинным – δ . Напряжение ошибки 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. таблицу 2) 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. [4]

Таблица 2 – Типы приводов

Тип привода / Схемы привода / Харак-теристика	Привод постоянного тока	Привод переменного тока	Муфтовый привод
Функциональная схема			
Механические характеристики			
Регуляционные характеристики			
Кинематика исполнительного механизма			

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 ЛУ 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 усилители $У1$ и $У2$ подается на обмотки управления муфтами. Величина и знак

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

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.[4]

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 $i_y = i_1 - i_2$.

2.2.4 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.[5]

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° , 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 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 не правилен 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.

2.3 Вывод

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 следящих приводов, был сделан вывод о том, что данный тип рулевых машин является оптимальным для выполнения задач выпускной квалификационной работы.

3 РАСЧЕТ РЕДУКТОРА И ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Исходя из технических требований и условий работы рассмотрим исходные параметры, необходимые для создания функциональной схемы.

Таблица 3 – Типы приводов

φ °	m_{po} кг	r_{po} м	$J_{рд}$ кг · м ²	t с	η	k_f Н · м/с
180	2	0.1	0.00058	0.5	0.92	0.4

Где φ – максимальное отклонение рабочего органа;

m_{po} – масса рабочего органа (камеры);

r_{po} – радиус рабочего органа (камеры);

$J_{рд}$ – момент инерции ротора двигателя;

t – минимальное значение времени, за которое необходимо повернуть камеру;

η – предполагаемый КПД редуктора;

k_f – коэффициент скоростного демпфирования манипулятора;

Электрический привод систем управления навигации имеет вид следящей системы, состоящую из исполнительного элемента, преобразующего электрическую энергию в механическую (электродвигатель), усилительно преобразовательных устройств (редуктор с передаточным числом преобразования момента) и измерителей угла рассогласования (система управления с заданием). Следящие электроприводы или системы управления положением представляют собой комплексы электропривода, отвечающие за управление перемещением и обеспечивающие стабилизацию положения рабочего органа регулирования относительно некоторой заданной системы координат. При этом изменение положения рабочего органа с той или иной степенью точности должна соответствовать указываемому значению к системе управляющему воздействию. Следящие электроприводы могут обеспечивать как линейное, так и угловое перемещение узла регулирования. Данная система

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

широко используется в космонавтике в качестве управления для солнечных батарей, а также в автоматизированных кранах и так далее.

Следящий электропривод основывается на регулировании на основе двигателей постоянного тока, коллекторных или машин с возбуждением от постоянных магнитов. В большинстве функциональных схем электрических приводов имеются: регулятор положения, регулятор скорости; регулятор тока, двигатель, регулируемый рабочий орган, датчики положения, скорости и тока. [6]

3.1 Моменты электропривода

В механической системе электропривода есть один элемент образующий движение всей системы. Этим элементом является электродвигатель. На данную систему со стороны двигателя воздействует электромагнитный момент (M), со стороны рабочего органа – статический момент (M_c), который включает в себя все остальные моменты: моменты сопротивления и момент нагрузки [7].

Условно моменты подразделяются на три категории:

- демпферные моменты;
- реактивные моменты;
- активные моменты;

Демпферный момент, или **момент вязкого трения** – это момент, пропорциональный скорости вращения или линейного перемещения рабочего органа, он меняет знак при изменении направления движения. Он описывается выражением:

$$M_{в.т.} = k_f \cdot \omega \quad (5)$$

где k_f – коэффициент коэффициент вязкого трения;

ω – скорость вращения вала.

Реактивный момент или **момент сухого трения** – это момент, обычно описывающий переход тела или рабочего органа к движению и изменяющий свой знак при изменении направления движения привода. Реактивный момент возникает при сжатии аморфных тел, трении, резании и т.п. В математическом выражении момента сухого трения наиболее широко используется метод

Амонта-Кулона, который иначе называется моментом кулоновского или классического сухого трения. Данный момент сухого трения может быть записан в виде:

$$M_{с.т.} = M_f \cdot \text{sign}(\omega) \quad (6)$$

где M_f – коэффициент момента кулоновского трения;

ω – скорость вращения.

Для корректного расчета максимального значения момента сухого трения необходимо понимать, что при попадании космического аппарата в космическое пространство, где преобладают низкие температуры абсолютного нуля, возможны замерзание и образование наледи на всех подвижных узлах и не подвижных элементах, ввиду этого стоит учесть и рассчитать необходимое усилие, которое разобьет куски льда и позволит начать работу электропривода.

Поэтому введем коэффициент момента кулоновского трения:

$$M_f = \cdot |M_{max} \cdot \sin(\theta)| \cdot (0.1 \dots 0.3) \quad (7)$$

Номинальный режим машины определяется углом $\theta = 20 - 30^\circ$. Рабочий диапазон изменения угла θ составляет $0 \dots 30^\circ$. Превышение нагрузки сверх номинальной может происходить только кратковременно. Для учёта разбивания льда возьмем коэффициент равный 0.1. Таким образом:

$$M_f = \cdot |M_{max} \cdot \sin(30)| \cdot 0.1 \quad (8)$$

Отсюда:

$$M_{с.т.} = |M_{max} \cdot \sin(30)| \cdot 0.1 \cdot \text{sign}(\omega) \quad (9)$$

В случае линейного перемещении электропривода вместо скорости вращения ω в необходимо подставлять линейную скорость движения V .

Активный момент – это момент, знак которого не меняется при изменении направления движения, но его модуль может быть, как зависимым (при скручивании и сжатии упругих тел), так и независимым от угла поворота или величины линейного перемещения (действие силы тяжести). В статическом виде – от растянутых, сжатых и скрученных упругих тел. Реальные моменты, которые воздействуют на привод, обычно содержат все перечисленные

составляющие. При их формальном описании используют приближенные аппроксимирующие зависимости, например, вида:

$$M_c = M_f \cdot \text{sign}(\omega) + (M_n - M_f) \frac{\omega}{\omega_n} s \quad (10)$$

где M_n, ω_n – номинальные момент и скорость рабочего органа соответственно;

s – показатель степени, определяющий характер изменения его момента при изменении скорости [7].

3.2 Приведение сил и моментов

К примеру, мы имеем электропривод, который состоит из электродвигателя, редуктора с передаточным коэффициентом q , коэффициентом полезного действия η и рабочего органа, который совершает вращательное – со скоростью ω_{po} , или поступательное – со скоростью V_{po} , движение. Тогда рабочий орган действует момент M_{po} , или сила F_{po} соответственно (см. рисунок 7). Определим, какой результирующий момент будет действовать на вал двигателя. Запишем уравнение баланса мощностей, которое при прямом потоке энергии имеет вид:

$$P_c = P_{po} + P_n \quad (11)$$

где P_c – мощность на валу двигателя (в статике);

P_{po} – мощность на валу рабочего органа;

P_n – потери в редукторе.

Тогда мощность на валу можно выразить через КПД:

$$P_c = \frac{P_{po}}{\eta} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_{po}}{P_c} \quad (13)$$

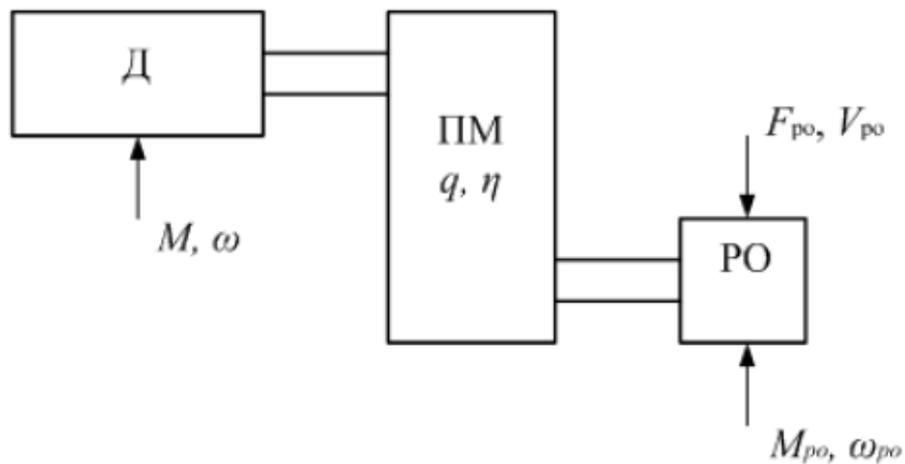


Рисунок 7 – Приведение моментов и сил

Мощность вращательного и поступательного движения соответствует выражению:

$$P_C = M \cdot \omega \quad (14)$$

$$P_{ро} = M_{ро} \cdot \omega_{ро} \quad (15)$$

$$P_{ро} = F_{ро} \cdot V_{ро} \quad (16)$$

Подставим последние (16) выражения для мощностей в уравнение (12) и получим:

$$M \cdot \omega = \frac{M_{ро} \cdot \omega_{ро}}{\eta} \quad (17)$$

$$M \cdot \omega = \frac{F_{ро} \cdot V_{ро}}{\eta} \quad (18)$$

Здесь первая формула соответствует вращательному движению рабочего органа, а вторая – поступательному. Сократим обе части данных уравнений на ω и найдем соотношения для приведения моментов и сил, вращательном и поступательном движении соответственно:

$$M = \frac{M_{ро}}{q \cdot \eta} \quad (19)$$

$$M = \frac{F_{ро} \cdot p}{\eta} \quad (20)$$

где: $q = \frac{\omega}{\omega_{ро}}$ – передаточное отношение редуктора;

$p = \frac{V_{ро}}{\omega}$ – радиус приведения нагрузки.

Получим уравнение баланса мощностей при обратном потоке энергии:

$$P_c = P_{po} - P_n \quad (21)$$

Отсюда мощность на валу:

$$P_c = P_{po} - \eta \quad (22)$$

Подставляя в (2.17) и (2.18) мощности, выраженные через моменты и раскрывая моменты согласно (2.13) и (2.14), получим уравнения для приведения моментов и сил при обратном потоке энергии при вращательном и поступательном движении соответственно:

$$M = \frac{P_{po} \cdot \eta}{q} \quad (23)$$

$$M = F_{po} \cdot \eta \cdot p \quad (24)$$

3.3 Приведение инерционных масс электропривода

Допустим, что электропривод состоит из двигателя, нескольких редукторов и рабочих органов. Пусть он содержит j поступательно движущихся элементов, и k вращательно движущихся элементов, включая элементы редукторов. Необходимо определить момент инерции к приведенной массе на валу двигателя, которая будет эквивалента воздействию всех фактических инерционных масс, с разным направлением движения. Данная операция называется приведением маховых и инерционных масс к валу двигателя.

Условием приведения является равенство суммарной кинетической энергии эквивалентной маховой массы и кинетической энергии всех исходных движущихся масс. Для движущихся линейно кинетическая энергия определяется выражением $W_j = \frac{mV^2}{2}$, для вращающихся тел $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$, тогда условие равенства кинетических энергий:

$$J_{пр} \frac{\omega^2}{2} = J_{дв} \frac{\omega^2}{2} + \sum_{s=1}^k J_s \frac{\omega_s^2}{2} + \sum_{i=1}^j m_i \frac{v_i^2}{2} \quad (25)$$

Если разделить обе части последнего уравнения на $\omega^2/2$, получим:

$$J_{пр} = J_{дв} + \sum_{s=1}^k \frac{J_s}{q_s^2} + \sum_{i=1}^j m_i p_i^2 \quad (26)$$

Из (26) нетрудно получить уравнения для приведения одной вращающейся и одной движущейся линейно массы соответственно:

$$J_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{ро}}}{q^2} \quad (27)$$

$$J_{\text{пр}} = m_{\text{ро}} \cdot p^2 \quad (28)$$

Если привести массу двигателя к валу рабочего органа через точные формулы приведения, то:

$$J_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_{\text{внеш}}^2) + \frac{1}{12} \cdot m \cdot (l^2) - \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_{\text{внут}}^2) + \frac{1}{12} \cdot m \cdot (l^2) \quad (29)$$

Формула (29) будет использоваться в дальнейшем

3.4 Предварительный расчет параметров двигателя

Ниже представлена методика расчета параметров двигателя и оптимального передаточного числа редуктора по критерию быстродействия.

Максимальная скорость привода определяется, как [8]:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{2 \cdot \varphi}{t} \quad (30)$$

$$\omega_{\text{max}} = \frac{2 \cdot 3.14}{0.5} = 12.56 \text{ (рад/с)}$$

Момент рабочего органа:

$$M_{\text{ро}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{в.т.}} \quad (31)$$

Исходя из уравнения (2.5) и (2.1) $M_{\text{ст}} = 1.489$; и $M_{\text{в.т.}} = 2.512$.

$$M_{\text{ро}} = 1.489 + 2.512 = 4.001 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Рассчитаем момент инерции рабочего органа:

$$J_{\text{ро}} = m_{\text{ро}} \cdot r_{\text{ро}}^2 \quad (32)$$

$$J_{\text{ро}} = 2 \cdot 0.1^2 = 0.02 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2)$$

Тогда предполагаемая мощность двигателя:

$$P = \frac{16 \cdot \varphi^2 \cdot J_{\text{ро}}}{t^2 \cdot per} \quad (33)$$

per – перегрузка, допустимая перегрузка для СД составляет не более 2,5

$$P = \frac{16 \cdot 3.14^2 \cdot 0.02}{0.5^2 \cdot 2} = 10.096 \text{ (Вт)}$$

Добротность предполагаемого двигателя:

$$D = \frac{8 \cdot \varphi^2 \cdot \sqrt{J_{po}}}{t^2 \cdot per} \quad (34)$$

$$D = \frac{8 \cdot 3.14^2 \cdot \sqrt{0.02}}{0.5^2 \cdot 2.5} = 5.684 \text{ (Н/кг}^{1/2}\text{)}$$

3.5 Расчет передаточного числа редуктора и параметров двигателя

Определяем приближенное первичное значение передаточного числа редуктора, принимая, что момент статический равен нулю:

$$q = \sqrt{\frac{J_{po}}{J_{pd}}} \quad (35)$$

$$q = \sqrt{\frac{0,02}{0,00072}} = 5.27$$

Значение электромагнитного момента двигателя, обеспечивающего поворот рабочего органа на заданный угол φ за время t определяется выражениями:

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \left(J_{pd} + \frac{J_{po}}{q^2 \cdot \eta} \right) \cdot \frac{\varphi \cdot q}{t^2} \quad (36)$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \left(0,00072 + \frac{0,02}{5.27^2 \cdot 0.92} \right) \cdot \frac{3.14 \cdot 5.27}{0.5^2} = 0.199 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M = B + \sqrt{B^2 + \frac{M_{po}^2}{q^2 \cdot \eta^2}} \quad (37)$$

$$M = 0.199 + \sqrt{0.199^2 + \frac{4.001^2}{5.27^2 \cdot 0.92^2}} = 1.048 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Относительное значение статического момента, приведенного к валу двигателя:

$$\mu = \frac{M_{po}}{q \cdot \eta \cdot M} \quad (38)$$

$$\mu = \frac{4.001}{5.27 \cdot 0.92 \cdot 1.048} = 0.788$$

Определим параметр, необходимый для повторного, точного расчета передаточного числа редуктора:

$$A = \sqrt{J_{po} + \frac{M_{po} \cdot t^2 \cdot \mu}{4 \cdot \varphi \cdot \eta}} \quad (39)$$

$$A = \sqrt{0.02 + \frac{4.001 \cdot 0.5^2 \cdot 0.788}{4 \cdot 3.14 \cdot 0.92}} = 0.297 \text{ (кг}^{1/2} \cdot \text{м)}$$

Теперь проведем повторный расчет, определим оптимальное передаточное число редуктора по критерию быстродействия:

$$q = \frac{A}{\sqrt{J_{\text{рд}}}} \quad (40)$$

$$q = \frac{0.297}{\sqrt{0,00072}} \approx 12.5$$

По ряду передаточных чисел R10 зададим $q = 12.5$ далее исходя из формулы (2.32) произведем расчет B заменяя прошлое значение q на новое.

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \left(0,00072 + \frac{0,02}{12.5^2 \cdot 0.92} \right) \cdot \frac{3.14 \cdot 12.5}{0.5^2} = 0.27 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Далее так же найдем новое значение M

$$M = 0.27 + \sqrt{0.27^2 + \frac{4.001^2}{12.5^2 \cdot 0.92^2}} = 1.048 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Тогда относительное значение статического момента, приведенного к валу двигателя (2.34):

$$\mu = \frac{4.001}{12.5 \cdot 0.92 \cdot 0.718} = 0.49$$

Оптимальное значение передаточного отношения редуктора исходя из (2.35):

$$A = \sqrt{0.02 + \frac{4.001 \cdot 0.5^2 \cdot 0.49}{4 \cdot 3.14 \cdot 0.92}} = 0.25 \text{ (кг}^{1/2} \cdot \text{м)}$$

Вычислим добротность двигателя:

$$C = 2 \cdot \frac{(A^2 + J_{\text{по}}^2) \cdot \varphi}{t^2 \cdot A} \quad (41)$$

$$C = 2 \cdot \frac{(0.25^2 + 0.02^2) \cdot 3.14}{0.5^2 \cdot 0.25} = 6.316 \text{ (Н/кг}^{1/2}\text{)}$$

$$D = C + \sqrt{C^2 + \frac{M_{\text{по}}}{A^2 \cdot \eta}} \quad (42)$$

$$D = 6.316 + \sqrt{6.316^2 + \frac{4.001}{0.25^2 \cdot 0.92}} = 16.784 \text{ (Н/кг}^{1/2}\text{)}$$

Тогда скорость:

$$\omega_n = q \cdot \left(2 \cdot \frac{\varphi}{t} \right) \quad (43)$$

$$\omega_n = 12.5 \cdot \left(2 \cdot \frac{3.14}{0.5} \right) = 157 \text{ (рад/с)}$$

Переведем в об/мин:

$$n = \frac{\omega_n \cdot 60}{2\pi} \quad (44)$$

$$n = \frac{157 \cdot 60}{2 \cdot 3.14} = 1500 \text{ (об/мин)}$$

Максимальная мощность:

$$P = M \cdot \omega_n \quad (45)$$

$$P = 1.048 \cdot 157 = 111.474 \text{ (Вт)}$$

Далее необходимо убедиться, что данная система действительно будет работать. Используем программу Jigrein и просимулируем процесс поворота рабочего органа с рассчитанными величинами [8].

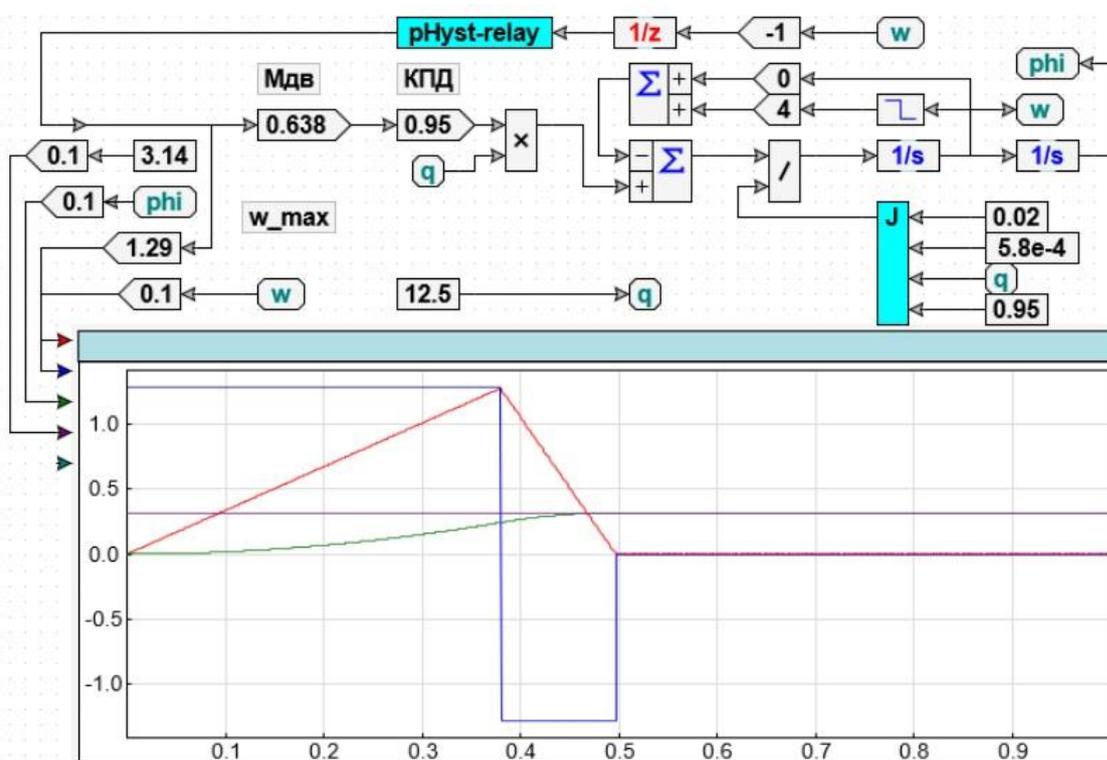


Рисунок 8 – Выбор оптимального редуктора по критерию быстродействия

Справа расположена модель электродвигателя и его нагрузка, слева расположены реле с гистерезисом (при достижении скоростью определенного значения изменяет направление действия момента двигателя, тем самым обеспечивая старт-стопный режим) и коэффициенты, учитывающие момент двигателя, КПД и передаточное число редуктора. Снизу расположена осциллограмма, на которой отображена динамика основных параметров

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

привода. На ней видно, что при расчетных значениях привод отработывает заданное перемещение за заданные техническим заданием 0.5 с. Кроме того на осциллограмме отчетливо отображены разгон и торможение электропривода [9]. Исходя из предложенных механических передач, для космического аппарата будет оптимальным выбор в сторону червячного редуктора редуктора, так как он соответствует всем требованиям для работы в инерциальном пространстве и высоким для него КПД.[9]

3.6 Выбор двигателя

Компоновки электродвигателей модернизируются с каждым годом. На сегодняшний день представлен большой выбор из модельного ряда самых разных двигателей в зависимости от требований по техническому заданию. Главной проблемой для устройств космических аппаратов является его надежность и массо-габаритные характеристики. Поэтому подбор электродвигателей несколько ограничен.

Электродвигатели подразделяются по характеру питающего электрического тока: двигатели переменного и постоянного тока, также классифицируют по строению: коллекторные и бесколлекторные. Также существуют разные конструктивные особенности (гистерезисный двигатель, шаговый двигатель, двигатель с возбуждением от постоянных магнитов).

В КА следует использовать бесколлекторные двигатели, так как перемещение щетки происходит только по оксидной пленке коллектора, которую невозможно получить в условиях вакуума. Так же исходя из технического задания, двигатель должен использовать питающий ток постоянный, так как подключение инвертора влечет за собой дополнительные затраты массы.

Лучший вариант для электродвигателя является проверенный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, отвечающий всем требованиям технического задания.

Из проведенных расчетов с несколькими итерациями можно сделать вывод, что:

- двигатель подобной установки должен развивать максимальную мощность 111,5 Вт;
- передаточное число редуктора будет составлять 12,5;
- при заданном передаточном числе двигателю необходимо вращаться со скоростью 1500 об/мин;

Исходя из рассчитанных данных был выбран двигатель ДБМ70-0,04-3-3.

Основные параметры электродвигателя приведены в таблице 4.

Таблица 5 – Основные параметры электродвигателей

Параметры	ДБМ70-0,04-3-3
Массогабаритные параметры	
Внешний диаметр статора, мм	70
Осевая длина статора, мм	28
Число пар полюсов	8
Осевая длина ротора, мм	37
Число фаз	3
Момент инерции ротора кг · м ²	5.8 · 10 ⁻⁴
Электромеханические параметры	
Номинальное напряжение, В	24
Номинальная нагрузка, Н · м	0,3
Сопротивление фазы, Ом	5,31
Частота вращения идеального холостого хода, об/мин	1200-1700
Пусковой момент, Н · м	0,3
Электромеханическая постоянная времени, мс	25,5
Статическая добротность, Н · м/(кг · √Вт)	0,18

Моментные двигатели далее (МД) – это электрические двигатели с конструктивными особенностями: маленькая рабочая скорость и бескорпусное

исполнение, т.е. отсутствие корпуса, вала и подшипников. Такие двигатели могут обеспечить точность с шагом в 3 минуты [10].

МД находят широкий диапазон применения в таких отраслях:

- следящих системах и системах угловой стабилизации высокой точности, в том числе, для бортовых установок наводных летательных и космических аппаратов;
- системах автоматического управления редукторного и безредукторного типа;
- исполнительных системах управления роботов и манипуляторов, биолоидов;
- медицинском приборостроении, где предъявляются повышенные требования к уровню шума и уровню пульсаций вращающего момента, а также герметизации;
- химической и микробиологической промышленности для передачи вращающего момента через герметичную перегородку в изолированную полость;
- приводных узлах, осей для мотор-колес гибридных электромобилей и т.д.

Для решения задачи оптимизации работы электродвигателя используя данные полученные ранее смоделируем электродвигатель в программном обеспечении RМхpert, предварительно рассчитав его характеристики с помощью соответствующих формул. И его сравнении с электродвигателем, предложенным на сегодняшний день от производителя. С целью уменьшения габаритов и увеличением КПД.

4 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Исходя из особых условий работы космического аппарата. К электродвигателю требования для устойчивой эксплуатации.

- Устойчивость к внешним воздействиям;
- Минимальные размеры;
- Отсутствие щеток
- Неперемагничиваемость составных частей электродвигателя.

Использование пятой и девятой военной приёмки не гарантирует радиационную стойкость элемента, подтверждением радиационной стойкости является указание стойкости к специальным факторам в технической документации.

В данной выпускной квалификационной работе основная часть материалов при разработке электродвигателя направлена на импортозамещение и использовании материалов и технологии производств у отечественных промышленных предприятий. Подбор электродвигателя будет направлен в сторону модели с открытым ротором так как этот двигатель обладает более меньшей массой.

4.1 Расчет параметров электродвигателя

Для моделирования электродвигателя, необходимо знать ее устройство, Следует понимать основные пункты для его расчета.

Размеры.

К основным размерам относятся диаметры статора ротора, виды и число пазов (трапециидальная, круглая, каплевидная итд). Также важно знать материалы изоляции для обмоток, и статора и ротора препятствующие перенасыщению, и перемагничиванию.

Магнитные расчеты.

Рисунок 9 – Принципиальная схема платы управления

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

В магнитных расчетах определяются магнитные потоки для каждого элемента электродвигателя, индуктивности и сопротивления, что позволяет определить насыщения определенных участков электродвигателя.

Расчет обмоток.

Немаловажной частью расчета, является подбор обмоток для условий оптимальных в соответствии с техническим заданием.

Расчет массы.

Масса один из важных факторов для космического аппарата. Электродвигатель должен быть легким и соответствовать заданным требованиям. Расчет должен быть не только для двигателя, но и для его обмоток.

Расчет потерь и КПД.

Коэффициент полезного действия должен быть очень высоким для поддержания работы узла космического аппарата, а потери минимальными.

4.1.1 Размеры

Для того чтобы рассчитать данные электродвигателя необходимо знать коэффициенты и постоянные для определения параметров двигателя.

Таблица 6 – Параметры для задания размеров электродвигателя

η	U	ΔU_k	k_0	B_r	α_δ	k_σ	k_B	B_δ	k_L
0.95	24	0.5	1.005	1.2	0.7	1.09	0.46	0.75	0.75
n	P_2/n	A	λ_k	δ	P_2	U'	H_c	k_{ob}	X
1500	0.074	30000	0.25	$0.25 \cdot 10^{-3}$	111	23.5	850000	0.95	1.06

Рассчитаем мощность электродвигателя:

$$P_{em} = P_2 \frac{(1+\eta)}{2 \cdot \eta} \quad (46)$$

$$P_{em} = 111 \frac{(1+0.95)}{2 \cdot 0.95} = 113.92 \text{ (Вт)}$$

Определим среднее значение ЭДС:

$$E_{cp} = \frac{1+\eta}{2} \cdot U' \quad (47)$$

$$E_{cp} = \frac{1+0.95}{2} \cdot 23.5 = 22.91 \text{ (В)}$$

Рассчитаем средние токи для электродвигателя:

$$I_{cp} = \frac{P_{em}}{E_{cp}} \quad (48)$$

$$I_{cp} = \frac{113.92}{22.91} = 4.972 \text{ (A)}$$

Выполним расчет коэффициента для двигателя:

$$k_d = \frac{\sqrt{[1+k_0 \cdot \left(\frac{E_{cp}}{U_f}\right)^2 - 2 \cdot \frac{E_{cp}}{U_f}]}}{1 - \frac{E_{cp}}{U_f}} \quad (49)$$

$$k_d = \frac{\sqrt{[1+1.005 \cdot \left(\frac{22.91}{23.5}\right)^2 - 2 \cdot \frac{22.91}{23.5}]}}{1 - \frac{22.91}{23.5}} = 2.93$$

По выражению 50 выполним расчет силы тока двигателя:

$$I_d = k_d \cdot I_{cp} \quad (50)$$

$$I_d = 2.93 \cdot 4.972 = 14.59 \text{ (A)}$$

По выражению 50 выполним расчет силы тока обмоток:

$$I_s = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (51)$$

$$I_s = 14.59 \sqrt{\frac{2}{3}} = 11.91 \text{ (A)}$$

Определим машинную постоянную:

$$C = \frac{6.1}{X \cdot k_L \cdot \alpha_\delta \cdot k_{ob} \cdot A \cdot B_\delta} \quad (52)$$

$$C = \frac{6.1}{1.06 \cdot 0.75 \cdot 0.7 \cdot 0.95 \cdot 30000 \cdot 0.75} = 5.13 \cdot 10^{-4}$$

Выведем табличное значение всех данных электродвигателя по ТЗ.

Таблица 7 – Основные размеры электродвигателя по ТЗ

D_a	D_m	l_δ	l_m	l_a	D_v	μ_0	m_f
0.07	0.09	0.02	0.021	0.02	0.025	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	3

Рассчитаем оптимальные размеры электродвигателя.

Таблица 8 – Оптимальные размеры для электродвигателя

h_c	h_p	a_z	h_m	h_{s1}	b_{s1}	α_δ	z	p	k_{lob}	l_m
0.004	0.004	0.006	$2 \cdot 10^{-3}$	0.0005	0.001	0.7	12	5	1.67	0.021

Рассчитаем наружный диаметр ротора:

$$D_n = D_a + 2(h_p + h_m + \delta) \quad (53)$$

$$D_n = 0.07 + 2 \cdot (0.004 + 2 \cdot 10^{-3} + 0.25 \cdot 10^{-3}) = 0.0825 \text{ (м)}$$

Рассчитаем высоту паза:

$$h_{paz} = \frac{D_a}{2} - \frac{D_v}{2} - h_c \quad (54)$$

$$h_{paz} = \frac{0.07}{2} - \frac{0.025}{2} - 0.004 = 0.0185 \text{ (м)}$$

Определим высоту коронки:

$$a_{po} = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_{s1}) - z \cdot a_z}{z} \quad (55)$$

$$a_{po} = \frac{3.14 \cdot (0.07 - 2 \cdot 0.0005) - 12 \cdot 0.006}{12} = 0.012 \text{ (м)}$$

$$a_p = \frac{a_{po} - b_{s1}}{2} \quad (56)$$

$$a_p = \frac{0.012 - 0.001}{2} = 5.532 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

Рассчитаем высоту паза:

$$h_{z1} = a_p \cdot \tan\left(\frac{\pi}{12}\right) \quad (57)$$

$$h_{z1} = 1.482 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

Большая ширина статора определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_{s1} - 2 \cdot h_{z1})}{z} - a_z \quad (58)$$

$$d_1 = \frac{3.14 \cdot (0.07 - 2 \cdot 0.0005 - 2 \cdot 1.482 \cdot 10^{-3})}{12} - 0.006 = 11.3 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

Меньшая ширина паза статора определяется по формуле:

$$d_2 = \frac{\pi \cdot (D_v + 2 \cdot h_c)}{z} - a_z \quad (59)$$

$$d_2 = \frac{3.14 \cdot (0.025 + 2 \cdot 0.004)}{12} - 0.006 = 2.64 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

Площадь паза определяется по выражению:

$$S_{paz} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \cdot (h_{paz} - h_{z1} - h_{s1}) + \frac{d_1 + d_{s1}}{2} \cdot h_{z1} \quad (60)$$

$$S_{paz} = \frac{(11.3 \cdot 10^{-3} + 2.64 \cdot 10^{-3})}{2} \cdot (0.0185 - 1.482 \cdot 10^{-3} - 0.001) + \frac{11.3 \cdot 10^{-3} + 0.001}{2} \cdot 1.482 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{)}$$

Рассчитаем ширину зубца статора:

$$a_z = \frac{\pi \cdot 2}{z} \quad (61)$$

$$a_z = \frac{3.14 \cdot 2}{12} = 0.524 \text{ (м)}$$

$$\tau_{cp} = \frac{a_z}{2} \cdot (D_a - h_{paz}) \quad (62)$$

$$\tau_{cp} = \frac{0.524}{2} \cdot (0.07 - 0.0185) = 0.0135 \text{ (м)}$$

Определим вылет лобовых частей электродвигателя:

$$l_{lob} = \frac{\tau_{cp} - a_z}{2} \cdot k_{lob} \quad (63)$$

$$l_{lob} = \frac{0.0135 - 0.524}{2} \cdot 1.67 = 6.25 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

Наружная длина составляет:

$$l_n = l_a + 2 \cdot l_{lob} \quad (64)$$

$$l_n = 0.02 + 2 \cdot 6.25 \cdot 10^{-3} = 0.0325 \text{ (м)}$$

Рассчитаем длину ротора:

$$l_p = l_m + 2 \cdot 10^{-3} \quad (65)$$

$$l_p = 0.021 + 2 \cdot 10^{-3} = 0.023 \text{ (м)}$$

Пересчитаем наружный диаметр статора:

$$D_n = D_a + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_m + 2 \cdot h_p \quad (66)$$

$$D_n = 0.07 + 2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0.004 = 0.0825 \text{ (м)}$$

Ширину магнитов можно определить по формуле:

$$b_m = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta) \cdot \alpha_\delta}{2 \cdot p \cdot 1.04} \quad (67)$$

$$b_m = \frac{3.14 \cdot (0.07 + 2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.7}{2 \cdot 5 \cdot 1.04} = 0.0149 \text{ (м)}$$

4.1.2 Магнитная цепь

После определения основных размеров можно приступить к расчету магнитной цепи. Для определения насыщения элементов двигателя.

Для начала рассчитаем магнитный поток:

$$k_\mu = 1.6 \quad (68)$$

$$\Phi_1 = \frac{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m \cdot b_m \cdot h_m}{\delta \cdot k_\mu + h_m} \quad (69)$$

$$\Phi_1 = \frac{850000 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 0.021 \cdot 0.0149 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0.25 \cdot 10^{-3} \cdot 1.6 + 2 \cdot 10^{-3}} = 2.32 \cdot 10^{-4} \text{ (Вб)}$$

Индукцию ротора определяем по формуле:

$$B_p = \frac{\Phi_1}{2 \cdot h_p \cdot l_m} \quad (70)$$

$$B_p = \frac{2.32 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.004 \cdot 0.021} = 1.3811 \text{ (Тл)}$$

$$k_c = 0.9 \quad (71)$$

Определение индукции зубца по формуле:

$$B_z = \frac{\Phi_1 \cdot 2 \cdot p}{z \cdot a_z \cdot l_m \cdot k_c} \quad (72)$$

$$B_z = \frac{2.32 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 5}{12 \cdot 0.524 \cdot 0.021 \cdot 0.9} = 1.535 \text{ (Тл)}$$

Рассчитаем индукцию в спинке статора по выражению:

$$B_c = \frac{\Phi_1 \cdot 2 \cdot p}{z \cdot h_c \cdot l_m \cdot k_c} \quad (74)$$

$$B_c = \frac{2.32 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 5}{12 \cdot 0.004 \cdot 0.021 \cdot 0.9} = 1.535 \text{ (Тл)}$$

По расчетным индукциям обратимся к кривым намагничивания для материалов, из которых изготовлен двигатель. Магниты используем SmCo₂, так как по техническому заданию они соответствуют коэрцитивной силе магнита. Сталь должна быть конструкционной, из которой будет изготовлена деталь электродвигателя и должна препятствовать перемагничиванию. Подходит сталь 3 соответственно для ротора (75); для зубца (76); для статора подойдет сталь 2412, так статор будет шихтованным, он должен препятствовать перемагничиванию быть достаточно крепким для работы в агрессивных условиях (77):

$$H_p = 1.98 \cdot 10^3 \quad (75)$$

$$H_z = 1.7 \cdot 10^3 \quad (76)$$

$$H_{ct} = 714.7 \quad (77)$$

Определим длину средней магнитной линии по формуле:

$$l_{-c} = [h_c + (D_v + h_c) \cdot \frac{\pi}{z}] \cdot 0.5 \quad (78)$$

$$l_{-c} = \left[0.004 + (0.025 + 0.004) \cdot \frac{3.14}{12} \right] \cdot 0.5 = 5.8 \cdot 10^{-3}$$

Расчетная формула для определения магнитного сопротивления ротора:

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

$$R_{mr} = \frac{H_p \cdot l_c}{\Phi_1} \quad (79)$$

$$R_{mr} = \frac{1.98 \cdot 10^3 \cdot 5.8 \cdot 10^{-3}}{2.32 \cdot 10^{-4}} = 1.22 \cdot 10^5$$

Определим величину магнитного сопротивления воздушного зазора формуле:

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot l_m \cdot \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta)}{2 \cdot p}} \quad (80)$$

$$R_{m\delta} = \frac{0.25 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 0.021 \cdot \frac{3.14 \cdot (0.07 + 2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 5}} = 4.28 \cdot 10^5$$

Определим величину магнитного сопротивления зубца:

$$R_{mz} = \frac{H_z \cdot h_{paz} \cdot z}{\Phi_1 \cdot 2 \cdot p} \quad (81)$$

$$R_{mz} = \frac{1.7 \cdot 10^3 \cdot 0.0185 \cdot 12}{2.32 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 5} = 1.63 \cdot 10^5$$

Рассчитаем магнитное сопротивление статора по формуле:

$$R_{mct} = \frac{H_{ct} \cdot l_c}{\Phi_1} \quad (82)$$

$$R_{mct} = \frac{714.7 \cdot 5.8 \cdot 10^{-3}}{2.32 \cdot 10^{-4}} = 1.79 \cdot 10^4$$

Запишем полученные данные:

$$b_{m1} = 0.021; b_{m2} = 0.0149; l_m = 0.021; b_m = 0.0149$$

Размеры в относительных определяется по формуле:

$$b_{m11} = \frac{b_{m1}}{h_m} \quad (83)$$

$$b_{m11} = \frac{0.021}{2 \cdot 10^{-3}} = 10.5$$

$$b_{m21} = \frac{b_{m2}}{h_m} \quad (84)$$

$$b_{m21} = \frac{0.0149}{2 \cdot 10^{-3}} = 7.454$$

$$t_1 = \frac{t}{h_m} \quad (85)$$

$$t_1 = \frac{0}{2 \cdot 10^{-3}} = 0$$

Расчетный относительный коэффициент рассчитаем по выражению:

$$S_m = l_m \cdot b_m \quad (86)$$

$$S_m = 0.021 \cdot 0.0149 = 3.13 \cdot 10^{-4}$$

$$b_{\delta 1} = \frac{b_{m11} \cdot b_{m21} \cdot \delta \cdot h_m}{S_m} \quad (87)$$

$$b_{\delta 1} = \frac{7.454 \cdot 10.5 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3.13 \cdot 10^{-4}} = 0.125$$

$$\mu_{r1} = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0} \quad (88)$$

$$\mu_{r1} = \frac{1.2}{850000 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7}} = 1.12$$

Рассчитаем относительную глубину проникновения полей рассеяния со стороны торца:

$$\Delta y_{01} = 0.1204 + 0.0168 \cdot b_{m21} + 0.152 \cdot \mu_{r1} \cdot t_1 + b_{\delta 1} \cdot (0.237 + 0.173 \cdot t_1 - 0.086 \cdot \mu_{r1} \cdot t_1 \cdot b_{m21} \cdot \mu_{r1}) \quad (89)$$

$$\Delta y_{01} = \Delta y_{03} = 0.1204 + 0.0168 \cdot 7.454 + 0.152 \cdot 1.12 \cdot 0 + b_{\delta 1} \cdot (0.237 + 0.173 \cdot 0 - 0.086 \cdot 1.12 \cdot 0 \cdot b_{m21} \cdot 1.12) = 0.275$$

Угол расстановки магнита:

$$a_m = \frac{\pi}{p} \quad (90)$$

$$a_m = \frac{3.14}{5} = 0.628$$

$$\gamma = \frac{a_m}{2} \quad (91)$$

$$\gamma = \frac{0.628}{2} = 0.3142$$

Рассчитаем относительную глубину проникновения полей рассеяния со стороны торца:

$$\Delta y_{02} = 0.1204 + 0.0168 \cdot b_{m21} + 0.236 \cdot b_{\delta 1} - 0.0194 \cdot \mu_{r1} \cdot \gamma - 0.00243 \cdot \mu_{r1} \cdot \gamma \cdot b_{m21} \quad (92)$$

$$\Delta y_{02} = \Delta y_{04} = 0.1204 + 0.0168 \cdot 7.454 + 0.236 \cdot 0.125 - 0.0194 \cdot 1.12 \cdot 0.3142 - 0.00243 \cdot 1.12 \cdot 0.3142 \cdot 7.454 = 0.262$$

Определим разность размеров в относительных единицах:

$$\Delta b_{m1} = b_{m11} - b_{m21} \quad (93)$$

$$\Delta b_{m1} = 10.5 - 7.454 = 3.0463 \quad (94)$$

$$\lambda_{m1} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot b_{m21} - 0.0869 \cdot \Delta b_{m1} + 0.0118 \cdot b_{m21} \cdot \Delta b_{m1}) \cdot \Delta y_{01} \quad (95)$$

$$\lambda_{m1} = \lambda_{m3} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot 7.454 - 0.0869 \cdot 3.0463 + 0.0118 \cdot 7.454 \cdot 3.0463) \cdot 0.275 = 1.03$$

Определим удельные магнитные проводимости на единицу площади нейтрального сечения по формуле:

$$\lambda_{m2} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot b_{m21}) \cdot \Delta y_{02} \quad (96)$$

$$\lambda_{m2} = \lambda_{m4} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot 7.454) \cdot 0.262 = 1.03$$

Рассчитаем площади участков области формирования рабочего потока:

$$S_{m1} = \frac{b_{m11} + \Delta b_{m1} - 2 \cdot \Delta y_{02}}{2} \cdot \left(\frac{b_{m21}}{2} - \Delta y_{01} \right) \quad (97)$$

$$S_{m1} = S_{m3} = \frac{10.5+3.0463-2\cdot 0.262}{2} \cdot \left(\frac{7.454}{2} - 0.275\right) = 22.474$$

$$S_{m2} = \frac{b_{m21}}{2} - \Delta y_{01} \quad (98)$$

$$S_{m2} = S_{m4} = \frac{7.454}{2} - 0.275 = 3.452$$

Полезная проводимость в относительных единицах определяется по формуле:

$$\Lambda_{m1} = 2 \cdot \mu_{r1} \cdot (S_{m1} \cdot \lambda_{m1} + S_{m2} \cdot \lambda_{m2}) \quad (99)$$

$$\Lambda_{m1} = 2 \cdot 1.12 \cdot (22.474 \cdot 1.03 + 3.452 \cdot 1.03) = 60$$

$$\Lambda_m = h_m \cdot \mu_0 \cdot \Lambda_{m1} \quad (100)$$

$$\Lambda_m = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 60 = 1.51 \cdot 10^{-7}$$

Рассчитаем сопротивление магнита основному магнитному потоку:

$$R_m = \frac{1}{\Lambda_m} \quad (101)$$

$$R_m = \frac{1}{1.51 \cdot 10^{-7}} = 6.63 \cdot 10^6 \text{ (Ом)}$$

Определим полное магнитное сопротивление основному магнитному потоку:

$$R = R_{mr} + R_{m\delta} + R_{mz} + R_{mct} + R_m \quad (102)$$

$$R = 1.22 \cdot 10^5 + 4.28 \cdot 10^5 + 1.63 \cdot 10^5 + 1.79 \cdot 10^4 + 6.63 \cdot 10^6 = 7.36 \cdot 10^6 \text{ (Ом)}$$

Полезный магнитный поток определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{h_m \cdot H_c}{R} \quad (103)$$

$$\Phi = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 850000}{7.36 \cdot 10^6} = 2.31 \cdot 10^{-4} \text{ (Вб)}$$

Занесем основные данные в таблицу расчетов магнитной цепи СПДМ.

Таблица 9 – Основные характеристики двигателя в расчете магнитной цепи

Φ	$\Phi_1 = \Phi_{del}$	B_p	B_z	B_c	B_δ	f	k_m
$2.31 \cdot 10^{-4}$	$2.32 \cdot 10^{-4}$	1.381	1.71	1.53	0.74	125	0.35

4.1.3 Расчет витков

Площадь паза под обмотку определяется по выражению:

$$S_{m2} = S_{paz} - \frac{d_1 + b_{s1}}{2} \cdot h_{z1} \quad (104)$$

$$S_{m2} = 1.24 \cdot 10^{-4} - \frac{0.00113 + 10^{-3}}{2} \cdot 1.48 \cdot 10^{-3} = 1.15 \cdot 10^{-4}$$

Определим сечение меди одного паза:

$$Q_m = S_{pa} \cdot k_m \quad (105)$$

$$Q_m = 1.15 \cdot 10^{-4} \cdot 0.35 = 4.03 \cdot 10^{-5}$$

Таблица 10 – Основные параметры расчета обмоточных данных

k_{ob}	a	W_z	k_B	n_{el}	d	d_{iz}
0.933	1	20	1.11	5	$0.85 \cdot 10^{-3}$	$0.78 \cdot 10^{-3}$

ЭДС среды обмоток определим по формуле:

$$E_{sred} = \frac{1+\eta}{2} \cdot (U - 1) \quad (106)$$

$$E_{sred} = \frac{1+0.95}{2} \cdot (24 - 1) = 22.425$$

Определим число витков на фазу по выражению:

$$W_{faz2} = \frac{5.75 \cdot E_{sred} \cdot a}{p \cdot n \cdot k_{ob} \cdot \Phi} \quad (107)$$

$$W_{faz2} = \frac{5.75 \cdot 22.425 \cdot 1}{5 \cdot 1500 \cdot 0.933 \cdot 2.31 \cdot 10^{-4}} = 79.8$$

Определим число витков на зубец по выражению:

$$W_{zub2} = \frac{W_{faz2}}{\frac{z}{m_f}} \quad (109)$$

$$W_{zub2} = \frac{79.8}{\frac{12}{3}} = 19.95$$

$$W_f = W_z \frac{z}{m_f} \quad (110)$$

$$W_f = 20 \frac{12}{3} = 80$$

$$E_f = \frac{W_f \cdot 4 \cdot k_B \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{ob}}{a} \quad (111)$$

$$E_f = \frac{80 \cdot 4 \cdot 1.11 \cdot 125 \cdot 2.31 \cdot 10^{-4} \cdot 0.933}{1} = 9.56$$

Сечение эффективного проводника определим по формуле:

$$q = \frac{S_{pa} \cdot 0.35}{2 \cdot W_z} \quad (112)$$

$$q = \frac{1.15 \cdot 10^{-4} \cdot 0.35}{2 \cdot 20} = 1.0065 \cdot 10^{-6}$$

В таблице 10 приведено значение площади сечения элементарного проводника. По справочным данным сорнамента определим диаметр провода меди и диаметр изоляции меди.

Определим плотность тока по формуле:

$$J = \frac{I_s}{q \cdot a} \quad (113)$$

$$J = \frac{11.9086}{1.508 \cdot 10^{-4}} = 7.8971 \cdot 10^6$$

Данная плотность тока является оптимальной при выбранном по справочным данным обмоткам. Поэтому мы сможем использовать эти данные в дальнейшем расчете и проектировании.

4.1.4 Масса электродвигателя

Для КА важна масса так как от нее зависит дальнейшее проектирование. Предположительно мы получим двигатель меньшей массы, чем предложенный у производителя на сегодняшний день.

Для расчета массы двигателя необходимо знать плотность стали, коэффициент заполнения.

Коэффициент заполнения пакета сталью равен:

$$k_z = 0.9 \quad (114)$$

Плотность стали равна:

$$\rho_{st} = 7.8 \cdot 10^3 \quad (115)$$

Масса стали статора вычисляется по выражению:

$$m_c = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_v^2) - S_{paz} \cdot z \right) \cdot l_a \cdot k_z \cdot \rho_{st} \quad (116)$$

$$m_c = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (0.07 \cdot 0.07 - 0.08 \cdot 0.08) - 1.86 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \right) \cdot 0.02 \cdot 0.9 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 0.32 \text{ (кг)}$$

Масса стали статора вычисляется по выражению:

$$m_{med} = q \cdot L_{cp} \cdot W_f \cdot 3 \cdot \rho_{med} \quad (117)$$

$$m_{med} = 1.506 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0843 \cdot 80 \cdot 3 \cdot 8.9 \cdot 10^3 = 0.27 \text{ (кг)}$$

где L_{cp} – Средняя длина витка $L_{cp} = 0.0843$, $\rho_{мед}$ – плотность меди $\rho_{мед} = 8.9 \cdot 10^3$.

Масса ротора определяется

$$m_r = m_{str} + m_{mag} \quad (118)$$

$$m_r = 0.1995 + 0.0558 = 0.849 \text{ (кг)}$$

где m_{str} – масса стали ротора $m_{str} = 0.1995$, m_{mag} – масса магнитов $m_{mag} = 0.0558$.

Отсюда следует, что масса расчетного двигателя меньше массы двигателя, выбранного у производителя по параметрам ТЗ.

4.1.5 Сравнение выбранного двигателя и расчетного

При сравнении выбранного двигателя с расчетным можно отметить, что расчетный двигатель обладает меньшей массой, более высоким КПД. Что положительно повлияет для космического аппарата. Кроме того, данный двигатель отвечает всем требованиям технического задания для поворота по оси тангажа рабочего органа, установленного на гиросtabilизированной платформе космического аппарата.

4.2 Моделирование двигателя

После полученных расчетов с помощью формул, смоделируем двигатель в программном обеспечении Ansys electronics desktop. Для начала необходимо запустить вкладку RMXpert и пошагово добавить данные двигателя в соответствующие поля и запустить расчет.

При моделировании необходимо учитывать размер паза и его форму. Рассчитаем двигатель с трапециевидальным пазом, изображенным на рисунке.

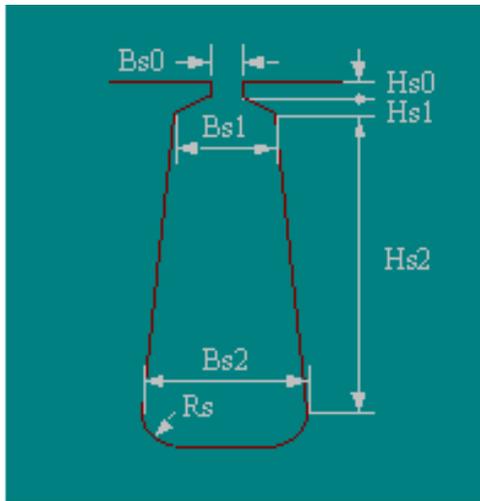


Рисунок 9 – Эскиз паза СПДМ

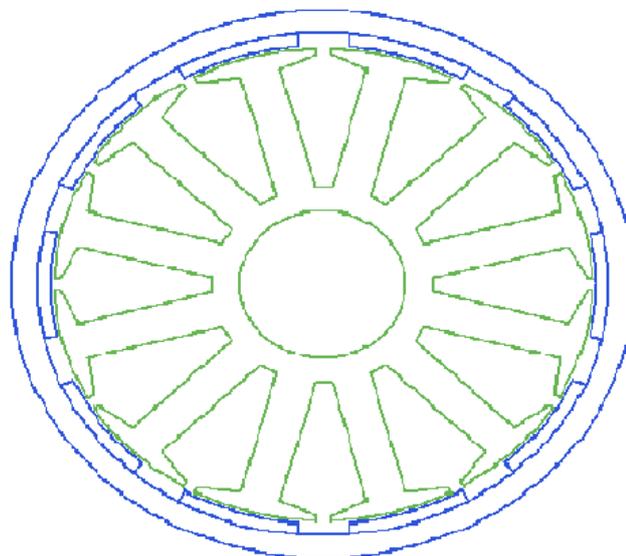


Рисунок 10 – Результат моделирования СПДМ в RMxpert

После моделирования получим эскиз вентельного электродвигателя с открытым ротором. При запуске расчета выведем общую таблицу значений электродвигателя.

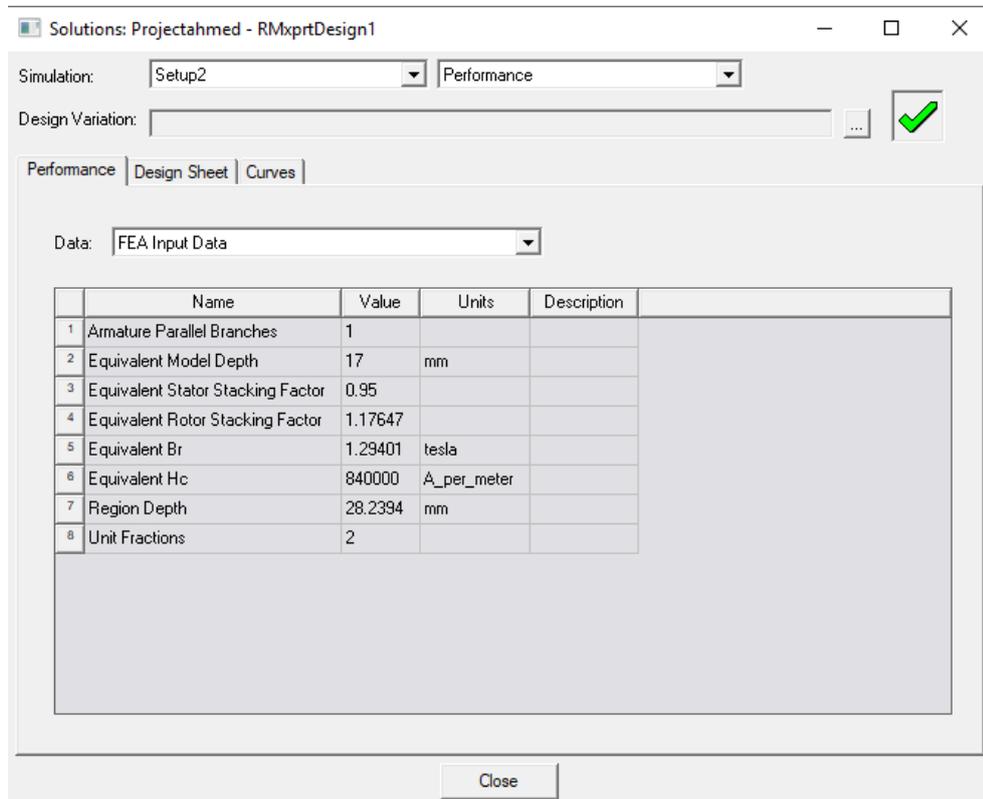


Рисунок 11 – Результат расчета в RMxprt СПДМ

Далее построим 2D модель в программном обеспечении Ansys electronics desktop. После построение в RMxprt 2d модель строится автоматически, а также добавляет графики зависимостей. После проделанных операций получим эскиз, как представленный на рисунке 16.

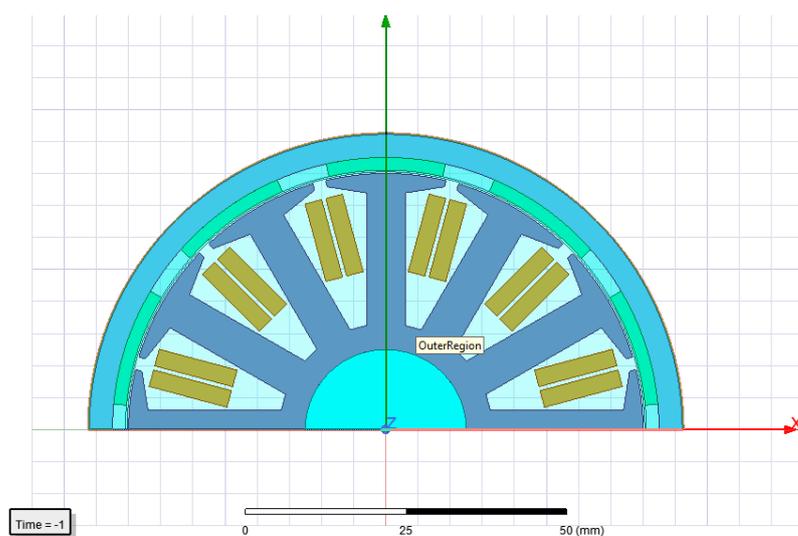


Рисунок 12 – Модель эскиза СПДМ в 2D

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

После добавления параметров и проведения расчетов были построены зависимости основных характеристик двигателя.

Итак, получены зависимости от времени: момента на валу (Рисунок 13), токов в обмотках фаз (Рисунок 14), фазных напряжений (Рисунок 15), потокосцепления (Рисунок 16), полезной мощности (Рисунок 17), линейно потребляемого тока (Рисунок 18), потребляемой мощности (Рисунок 19), потери в сердечнике (Рисунок 20), потери в стали (Рисунок 21), электродвижущая сила линейная (Рисунок 22).

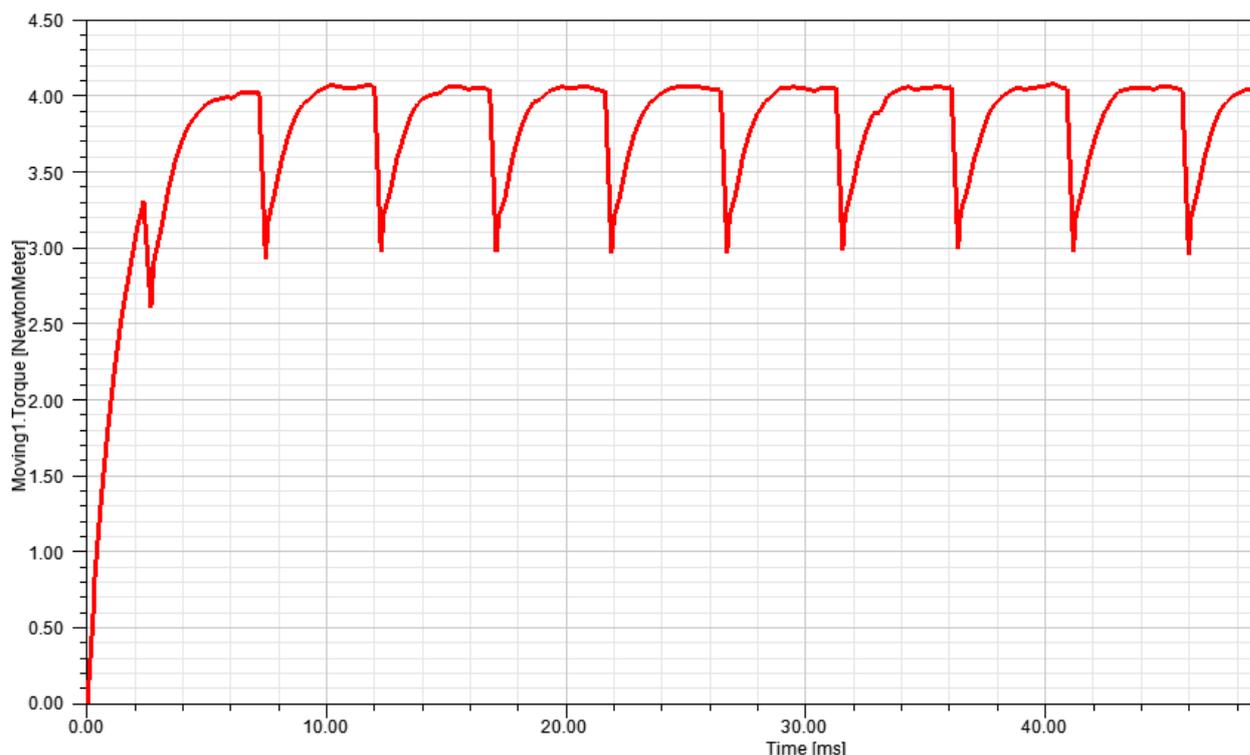


Рисунок 13 – График момента на валу двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

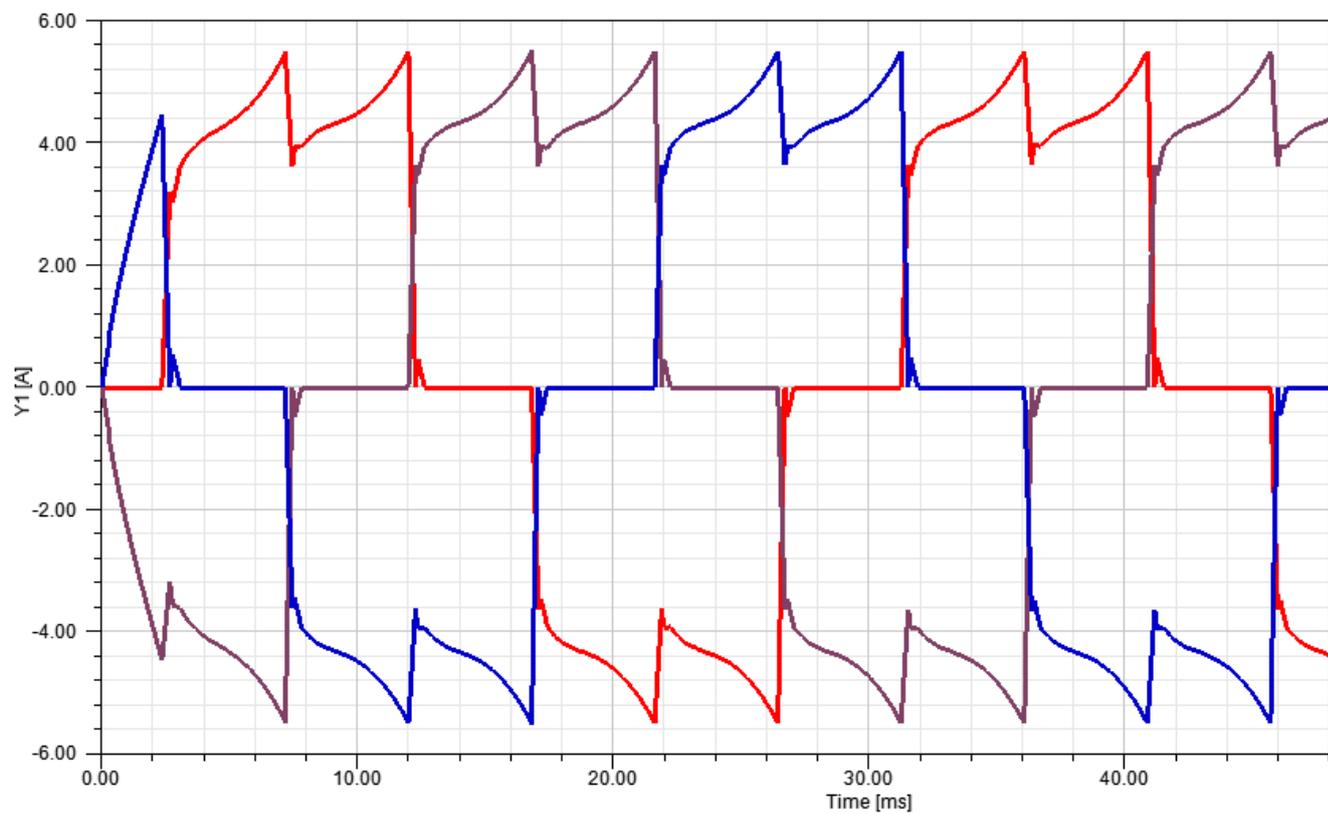


Рисунок 14 – График фазных токов

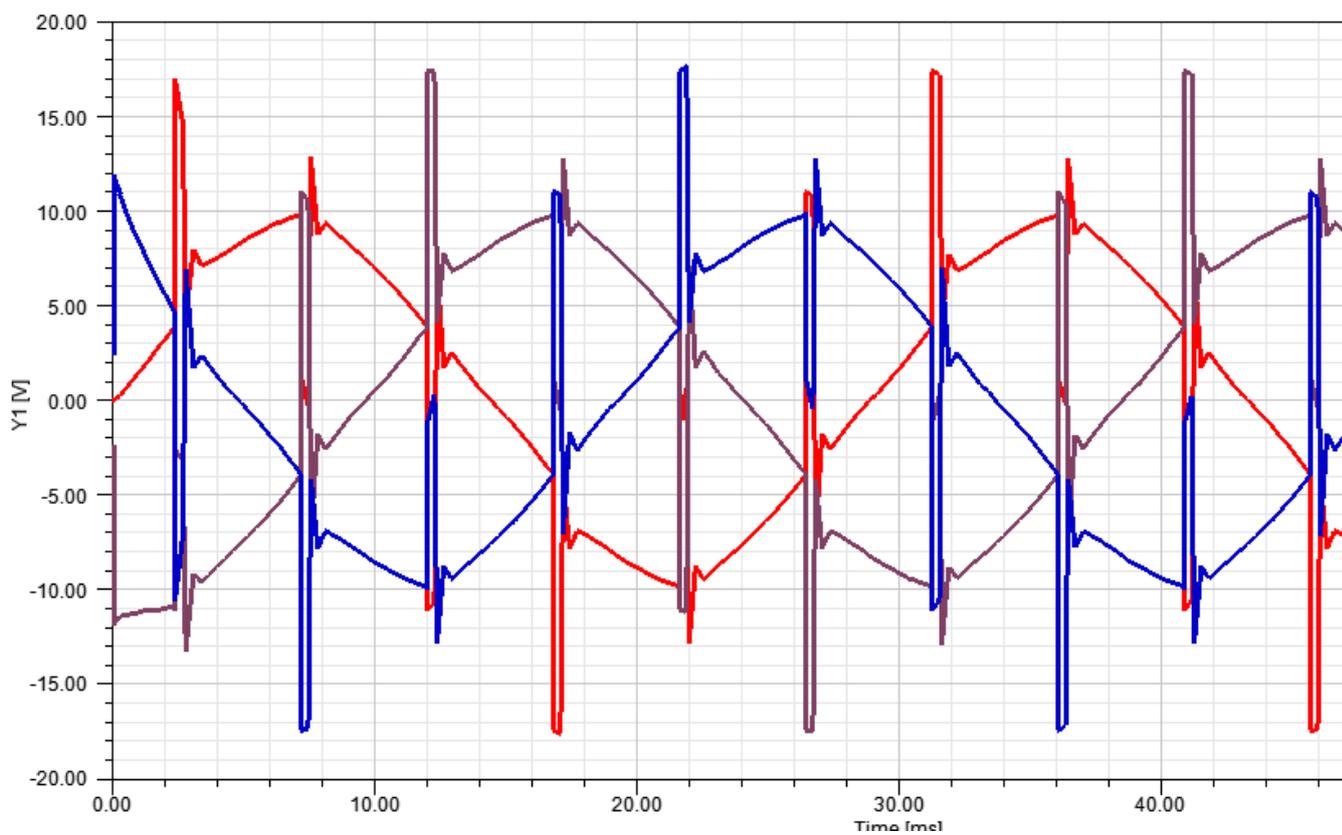


Рисунок 15 – График фазных напряжений

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

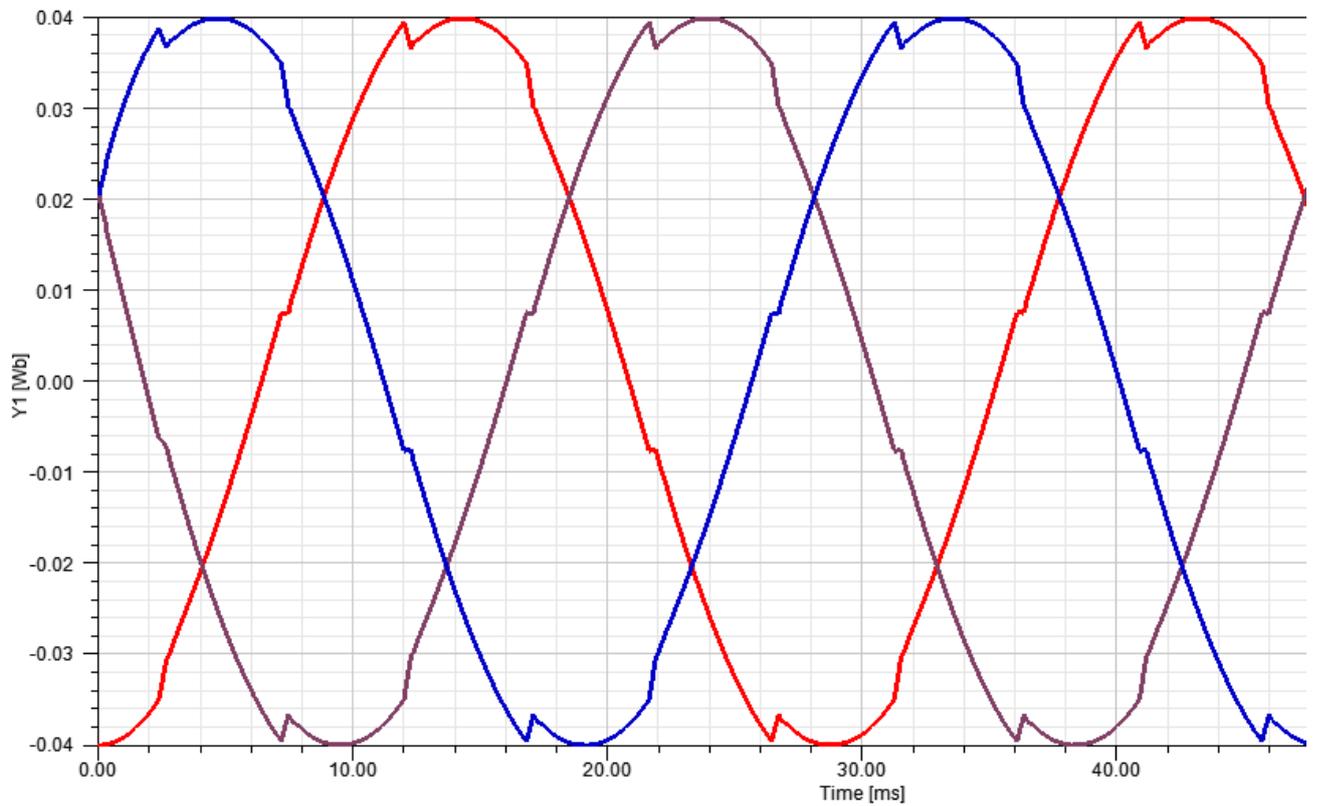


Рисунок 16 – График потокосцепления

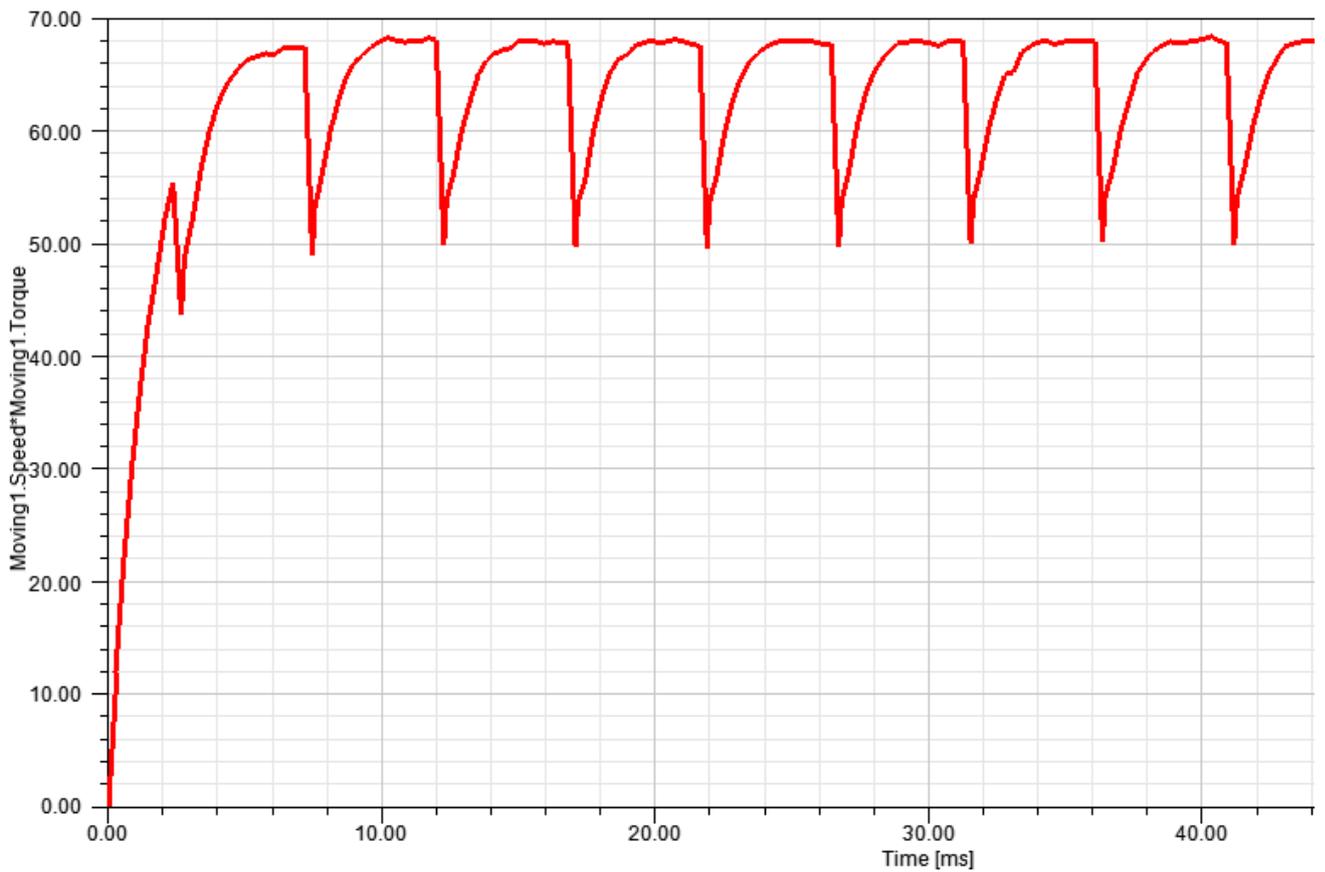


Рисунок 17 – График полезной мощности

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

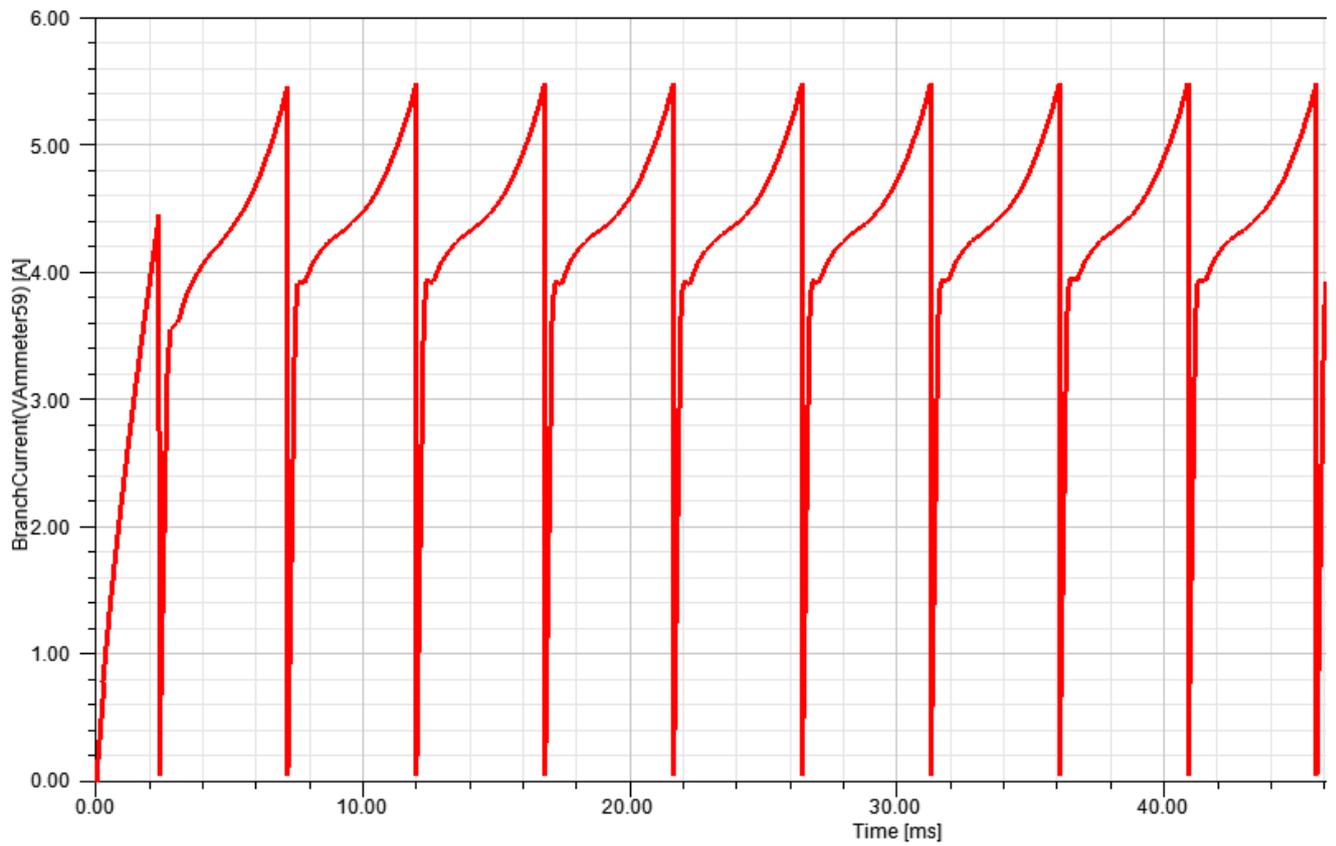


Рисунок 18 – График линейно потребляемого тока

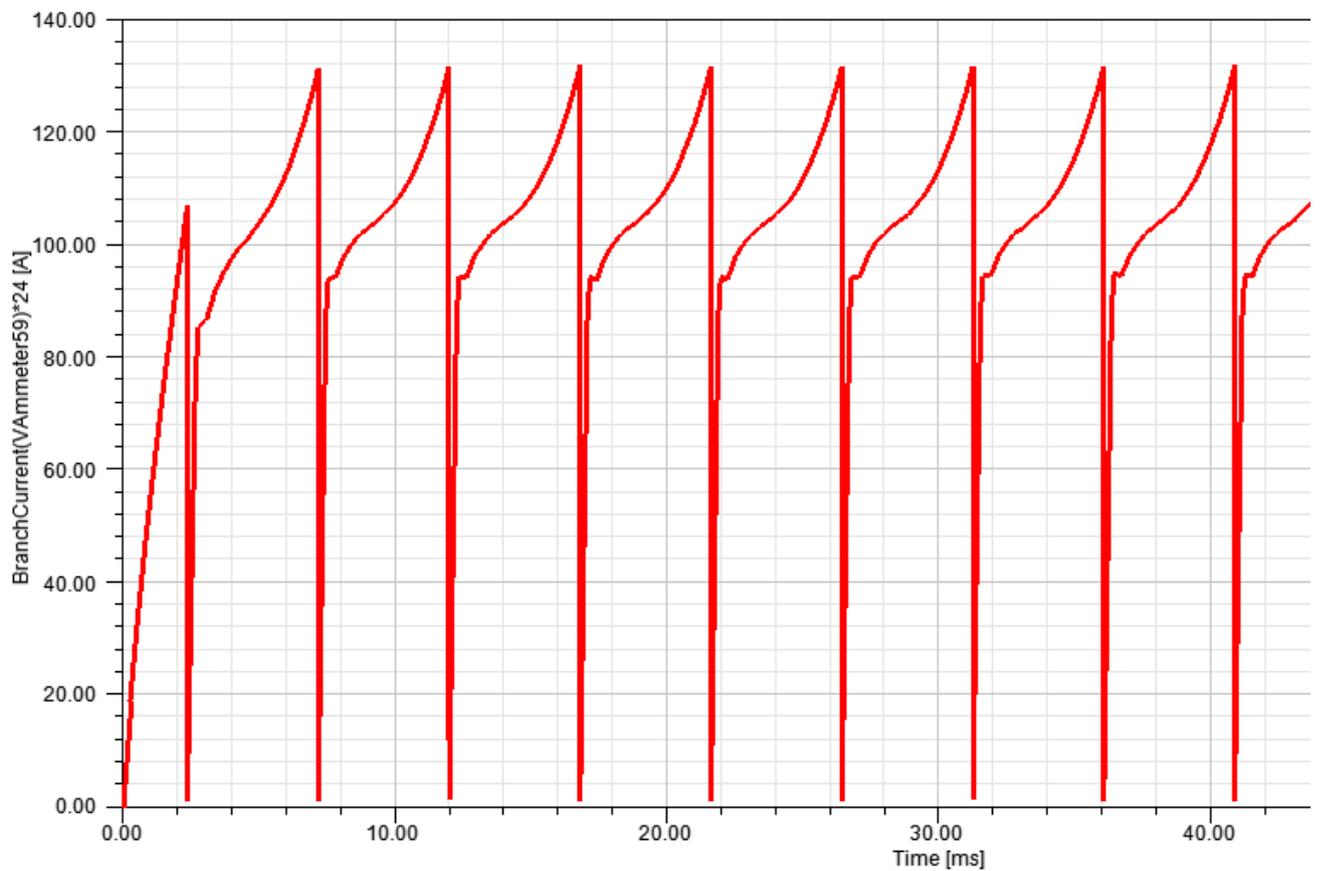


Рисунок 19 – График потребляемой мощности

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР

Лист

61

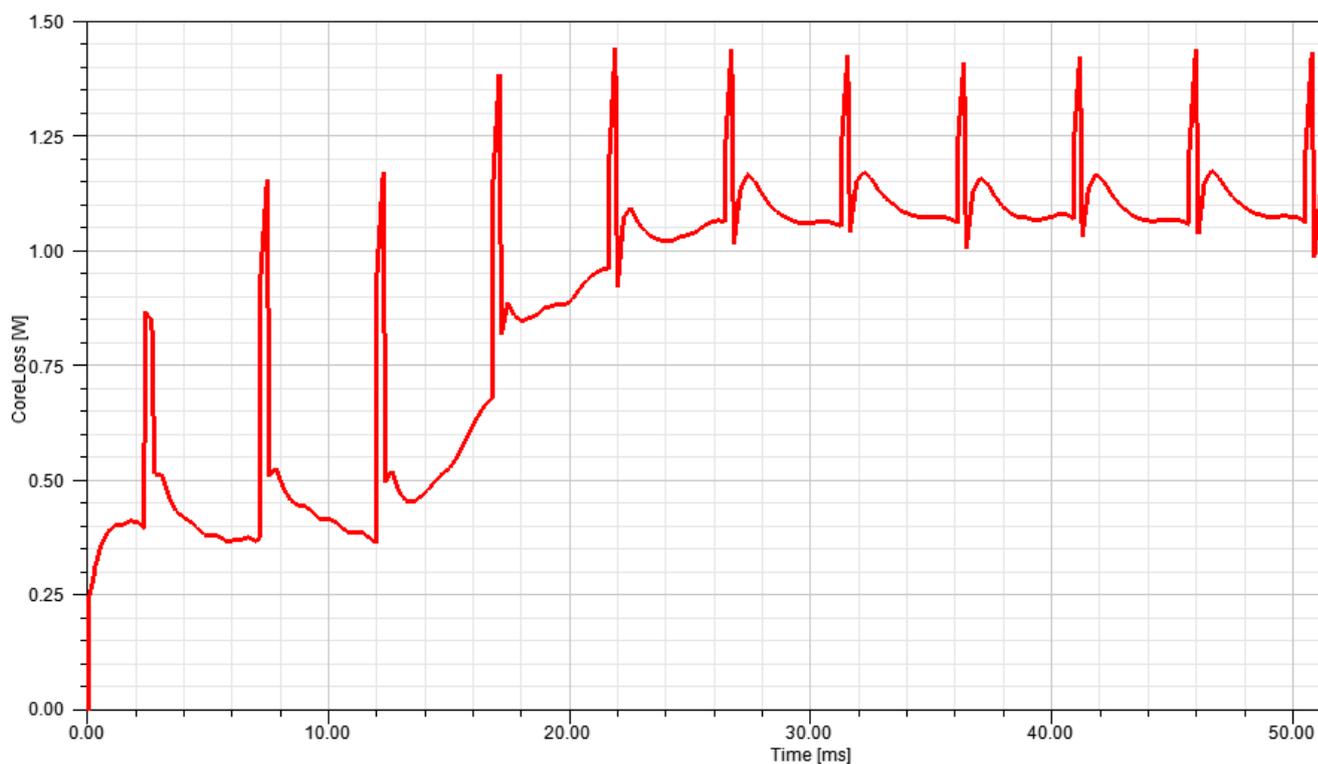


Рисунок 20 – Потери в сердечнике

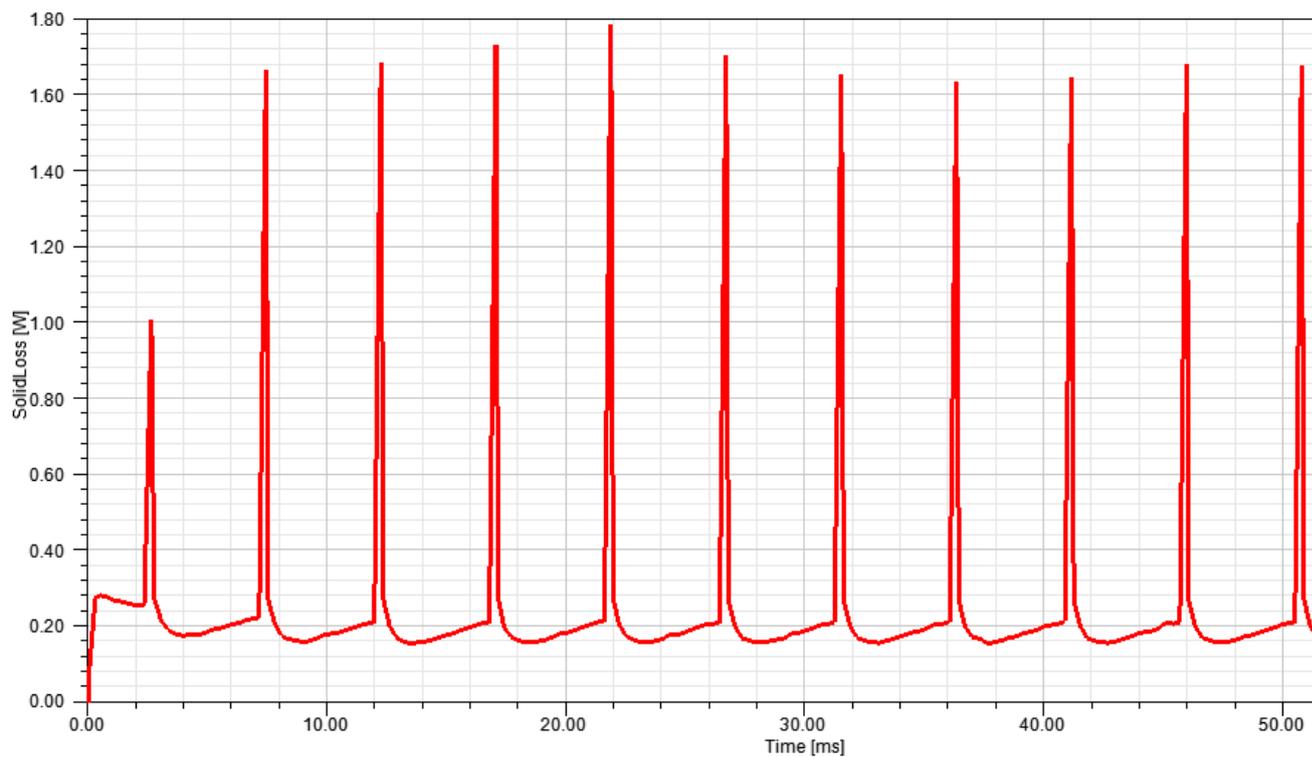


Рисунок 21 – График потерь в стали

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Полученные данные свидетельствуют о пульсирующем режиме работы двигателя, что говорит о работе на холостом ходу. Потери в сердечнике продолжительно нарастают во время включения, что требует более подробного рассмотрения. В остальном, характеристики соответствуют расчетным данным, представленным в предыдущих пунктах.

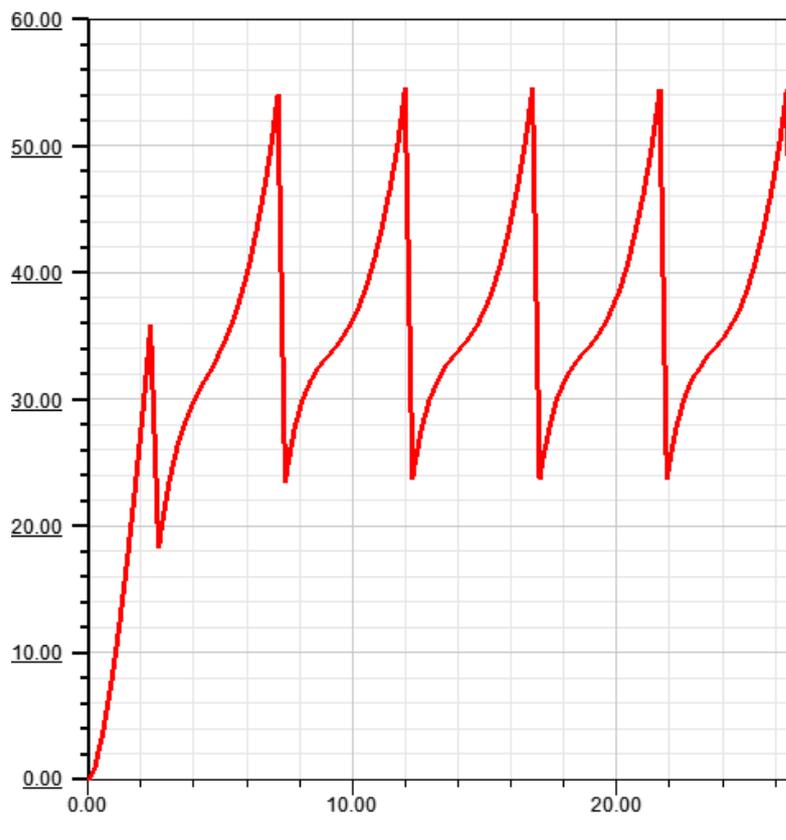


Рисунок 22 – График ЭДС

После получения данных зависимостей были получены зависимости от скорости: усредненная потребляемая мощность (Рисунок 23); усредненный ток (Рисунок 24); средние потери в сердечнике (Рисунок 25); средняя мощность на валу (Рисунок 26); средние потери в стали (Рисунок 27); усредненные фазные потери (Рисунок 28); среднеквадратичный ток фазы А (Рисунок 30).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

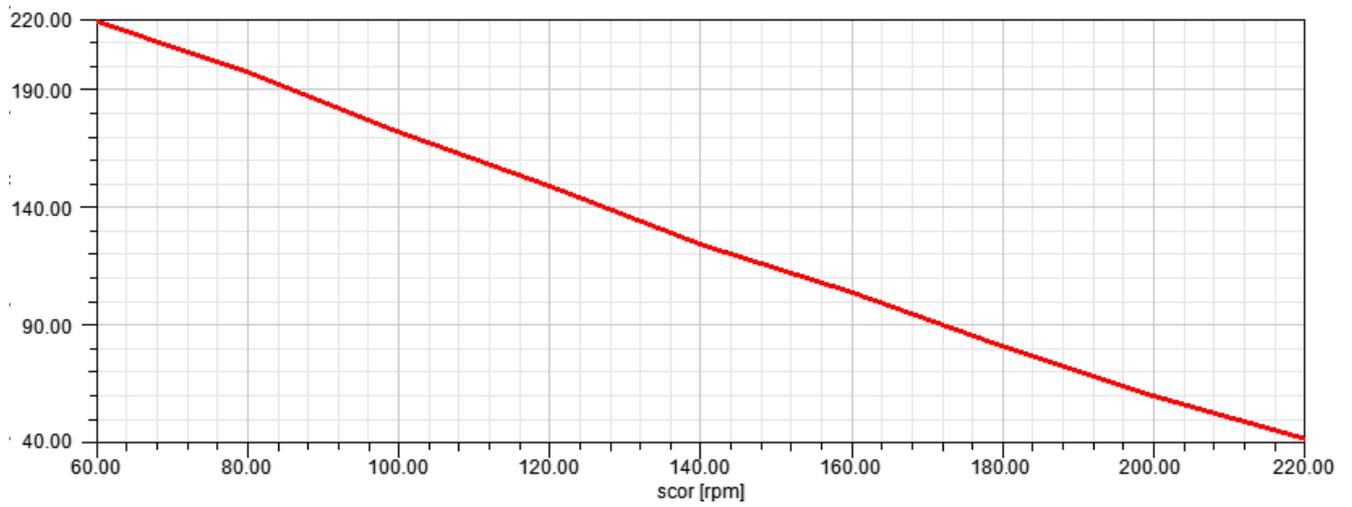


Рисунок 23 – Зависимость средней потребляемой мощности от скорости

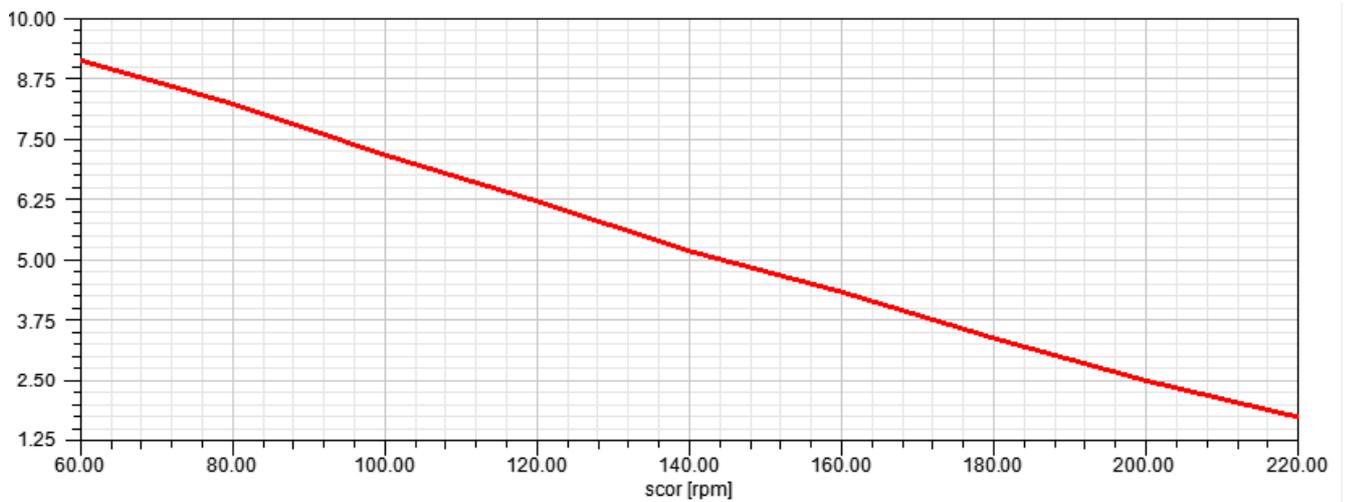


Рисунок 24 – Зависимость среднего потребляемого тока от скорости

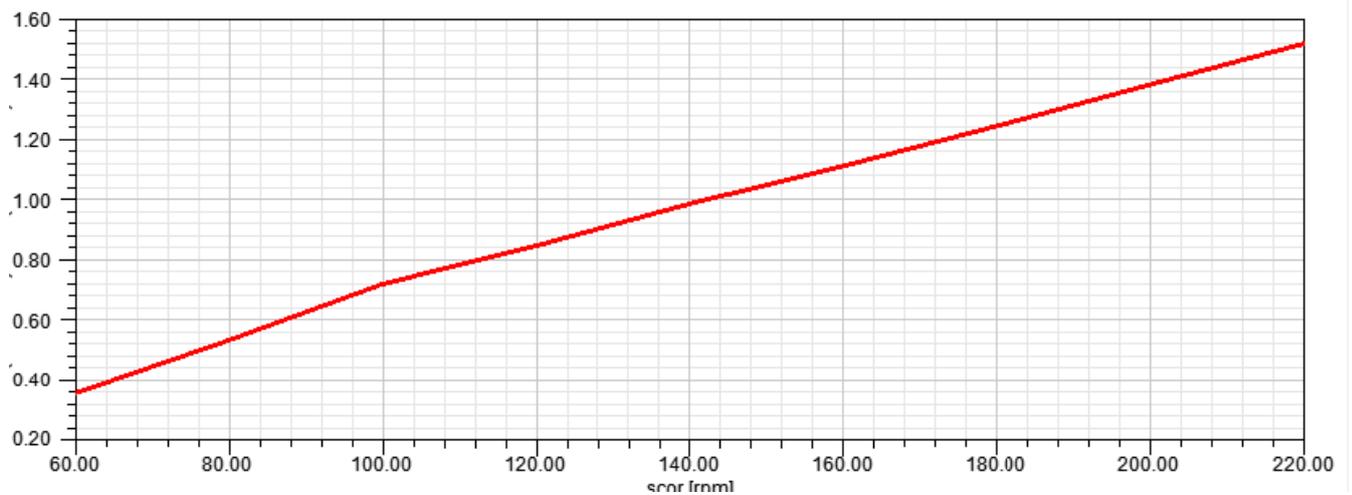


Рисунок 25 – Зависимость средние потери в сердечнике от скорости

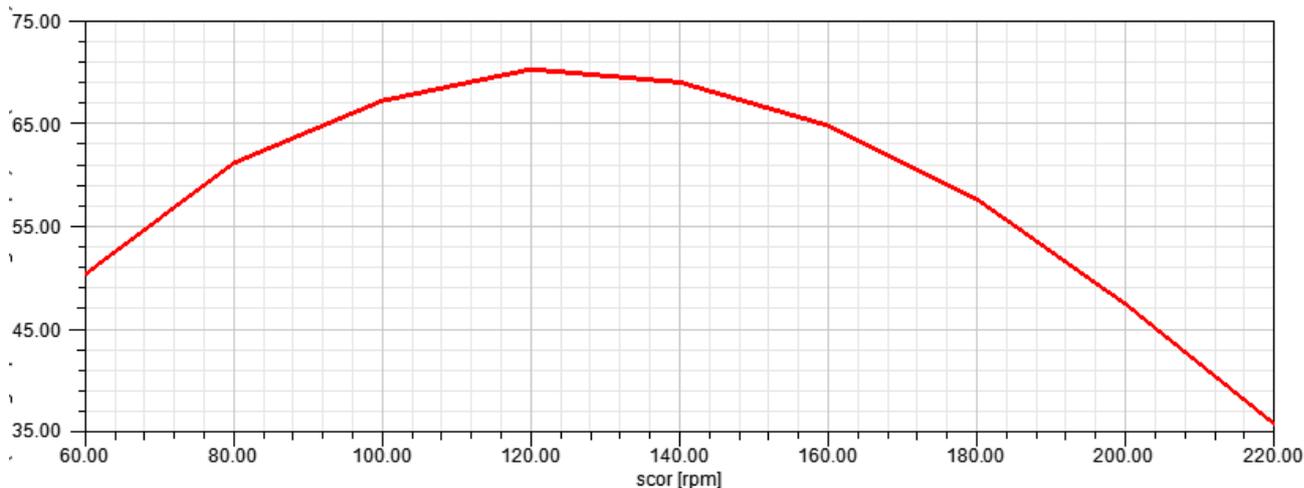


Рисунок 26 – Зависимость средней мощности на валу от скорости

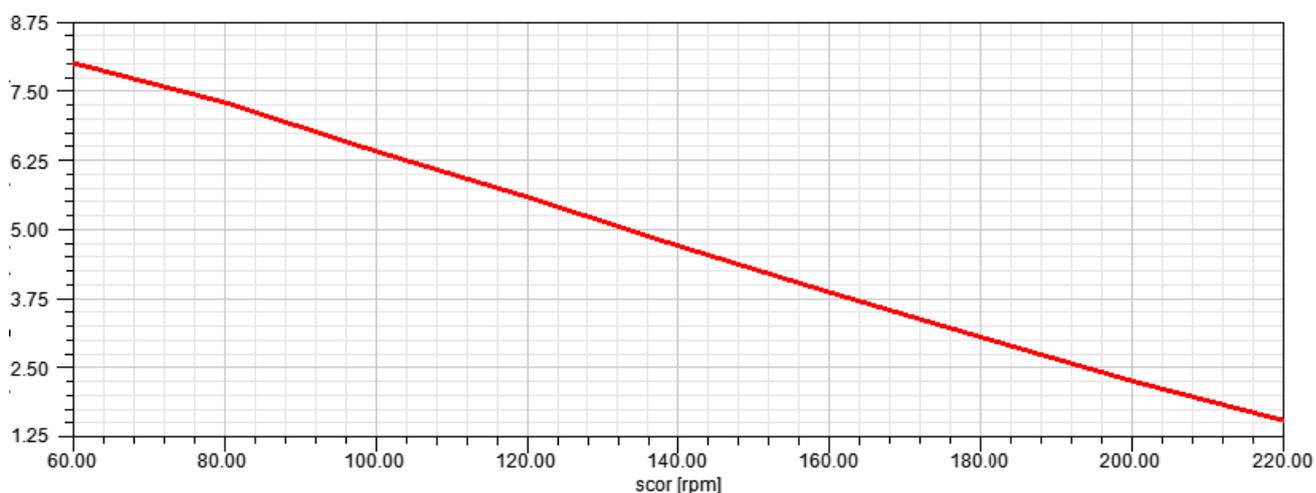


Рисунок 27 – Зависимость среднего момента на валу от скорости

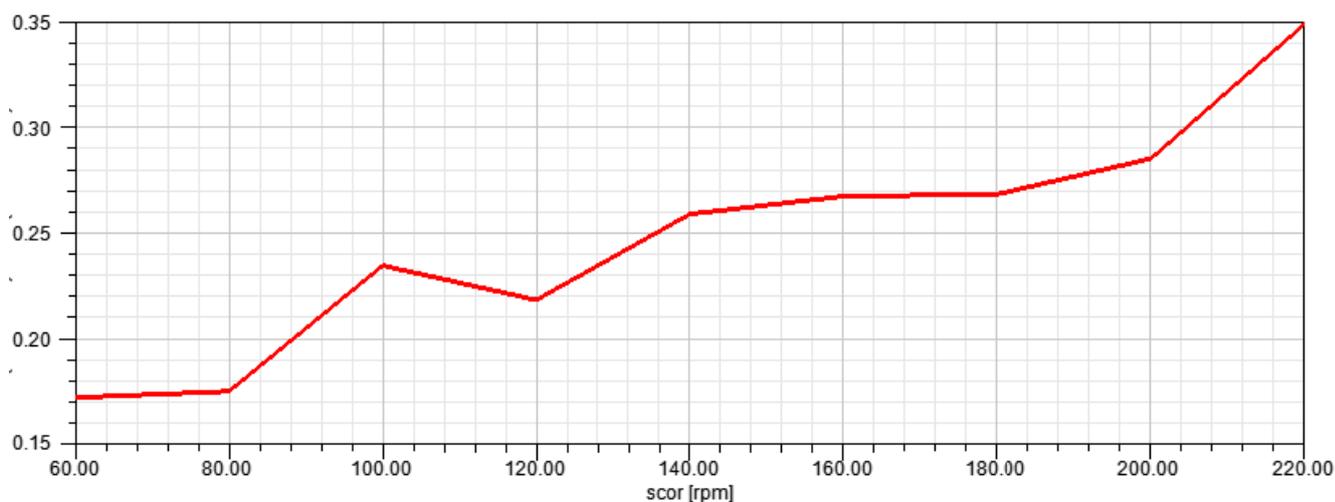


Рисунок 28 – Зависимость средних потерь в стали от скорости

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

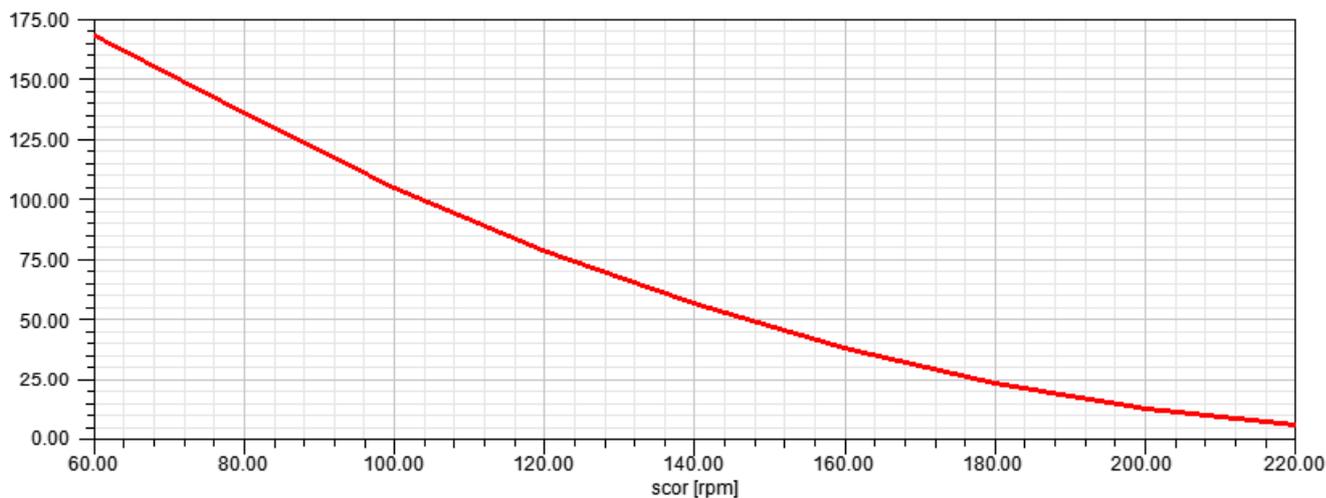


Рисунок 29 – Зависимость усредненных фазных потерь от скорости

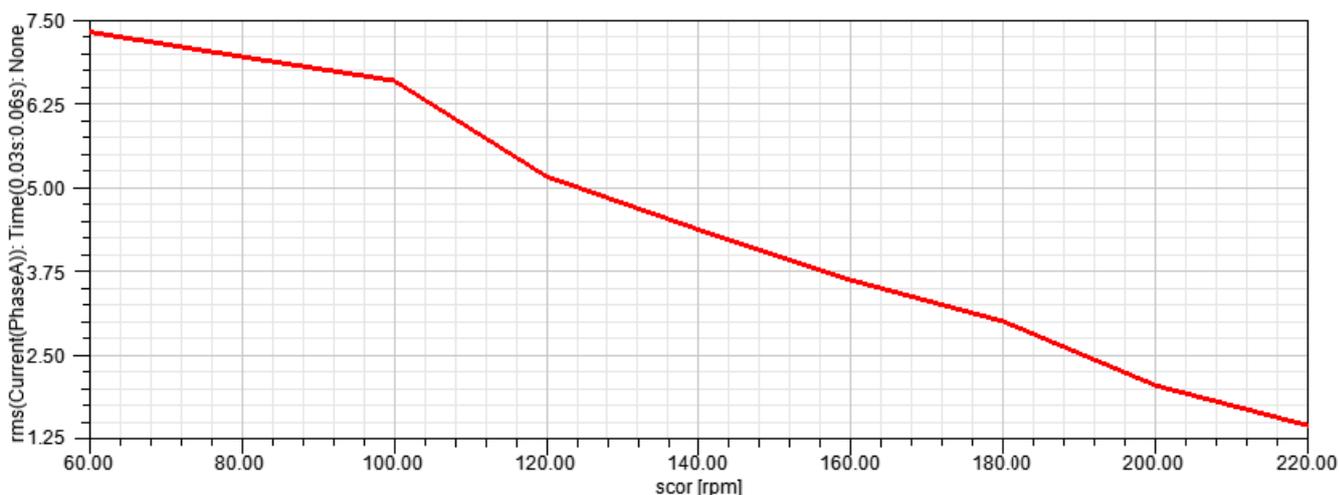


Рисунок 30 – Зависимость среднеквадратичного тока фазы А от скорости

После построения модели электродвигателя можно сделать выводы: Двигатель будет наиболее эффективным на скорости при своей номинальной скорости при превышении этой скорости в стали будут повышаться потери, а фазные уменьшаться. Также при рассмотрении механической и электромеханической характеристик можно охарактеризовать так, что широкой надстройки при регулировании данного электродвигателя.

5 ВЫБОР ДАТЧИКА

Существует много вариантов конструктивного исполнения и решения задач отслеживания положения вала ротора электродвигателя. На сегодняшний день для измерения моментных углов применяют такие виды датчиков измерения угла: датчик Холла, основанный на эффекте, потенциометрический датчик, вращающийся трансформатор, индукционный датчик. Рассмотрим отдельно каждый датчик. При данном расчете будут выбраны датчики Холла, зарекомендовавшие себя как они обладают достаточно простой конструкцией, невосприимчивы к вибрациям, а также неподвержены износу.

Такие датчики относятся к измерительно-преобразовательной технике, а именно к индукционным бесконтактным датчикам угла, предназначенным для преобразователя угла поворота ротора в электрическое напряжение, и может найти применение в качестве первичного датчика информации в аналоговых и дискретных (цифровых) системах. Такие датчики находят применение как в космической технике, так и в военной.

5.1 Датчики Холла

Интегральные датчики магнитного поля в своём большинстве используют эффект Холла, открытый американским физиком Эдвином Холлом в 1879 г. Эффект Холла, состоит в следующем. Если проводник с током помещён в магнитное поле, то возникает Э.Д.С., направленная перпендикулярно и току, и полю. Эффект Холла иллюстрируется на рисунке 18. По тонкой пластине полупроводникового материала протекает ток I . При наличии магнитного поля на движущиеся носители заряда (электроны) действует сила Лоренца. Данная сила искривляет траекторию движения электронов, что приводит к перераспределению объёмных зарядов в полупроводниковой пластине. Вследствие этого на краях пластины, параллельных направлению протекания тока, возникает Э.Д.С., называемая Э.Д.С. Холла.

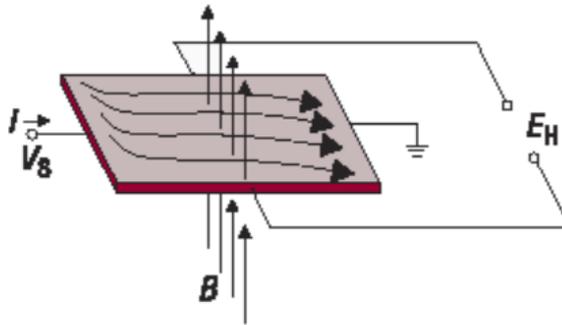


Рисунок 31 – Иллюстрация эффекта Холла

Э.Д.С. пропорциональна векторному произведению индукции B на плотность тока J :

$$E_H = \frac{d}{qn} [B \times j] \quad (119)$$

где d – ширина пластины, q – заряд частицы – носителя, n – концентрация носителей.

При снижении концентрации носителей Э.Д.С. Холла возрастает, поэтому в качестве материала для датчиков Холла предпочтительно использование таких полупроводников, как кремний, арсенид галлия и др. Для прямоугольной пластины с однородными током и магнитным полем, направленными, как показано на рисунке 2, эта Э.Д.С. равна:

$$E_H = K_H \cdot V_S \cdot B \quad (120)$$

где K_H – постоянная Холла, V_S – напряжение создаваемое на токоподводящих выводах датчика Холла.

Для кремния K_H составляет 70 мВ/(В·Тл), поэтому, как правило, Э.Д.С. датчика Холла требуется усиливать. Кремний обладает тензорезистивным эффектом, заключающимся в изменении сопротивления при механических напряжениях. Желательно уменьшить это влияние в датчике Холла. Это достигается соответствующей ориентацией элемента Холла на интегральной схеме и использованием нескольких элементов на кристалле. На рисунке 32 показаны два элемента Холла, расположенные рядом на кристалле ИМС. Они

позиционированы так, что испытывают практически одинаковое механическое напряжение, вызывающее изменение R . К элементу, который на рисунке изображён слева, приложено напряжение возбуждения V_B , направленное по вертикальной оси, а к изображённому справа – по горизонтальной. При сложении сигналов этих двух датчиков ошибка, вызванная деформацией кристалла, компенсируется.

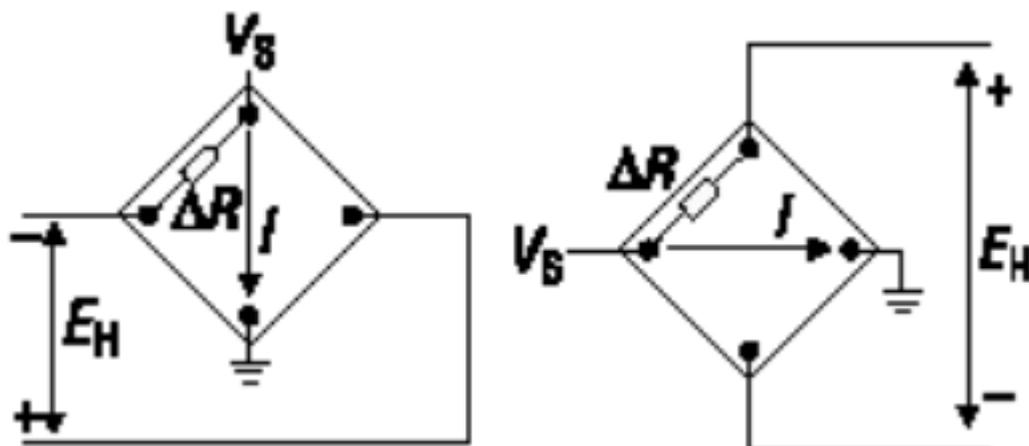


Рисунок 32 – Расположение двух элементов Холла на ИМС, компенсирующее ошибку, вызванную механической деформацией кристалла

5.1.1 Интегральные датчики Холла

Датчики Холла являются основой многих типов датчиков, таких как датчики линейного или углового перемещения, датчики магнитного поля, датчики тока, датчики расхода и др. Удобство бесконтактного срабатывания (полное отсутствие механического износа), низкая стоимость, простота использования делают их незаменимыми в приборостроении, автомобильной, авиационной и других отраслях промышленности. Интегральные датчики Холла производят такие фирмы, как Honeywell, Melexis, Allegro Microsystems, Micronas Intermetall, Siemens, Analog Devices и др. Первая группа интегральных датчиков Холла – это линейные устройства, применяющиеся в измерителях напряжённости магнитного поля. Как правило, эти устройства содержат схемы усиления сигнала датчика. Необходимая предварительная обработка сигнала обычно заключается в усилении и температурной компенсации. Может

понадобится также стабилизация питающего напряжения. При отсутствии магнитного поля выходное напряжение датчика должно быть равно нулю, поэтому требуется дифференциальный усилитель, который представлен на рисунке 33.

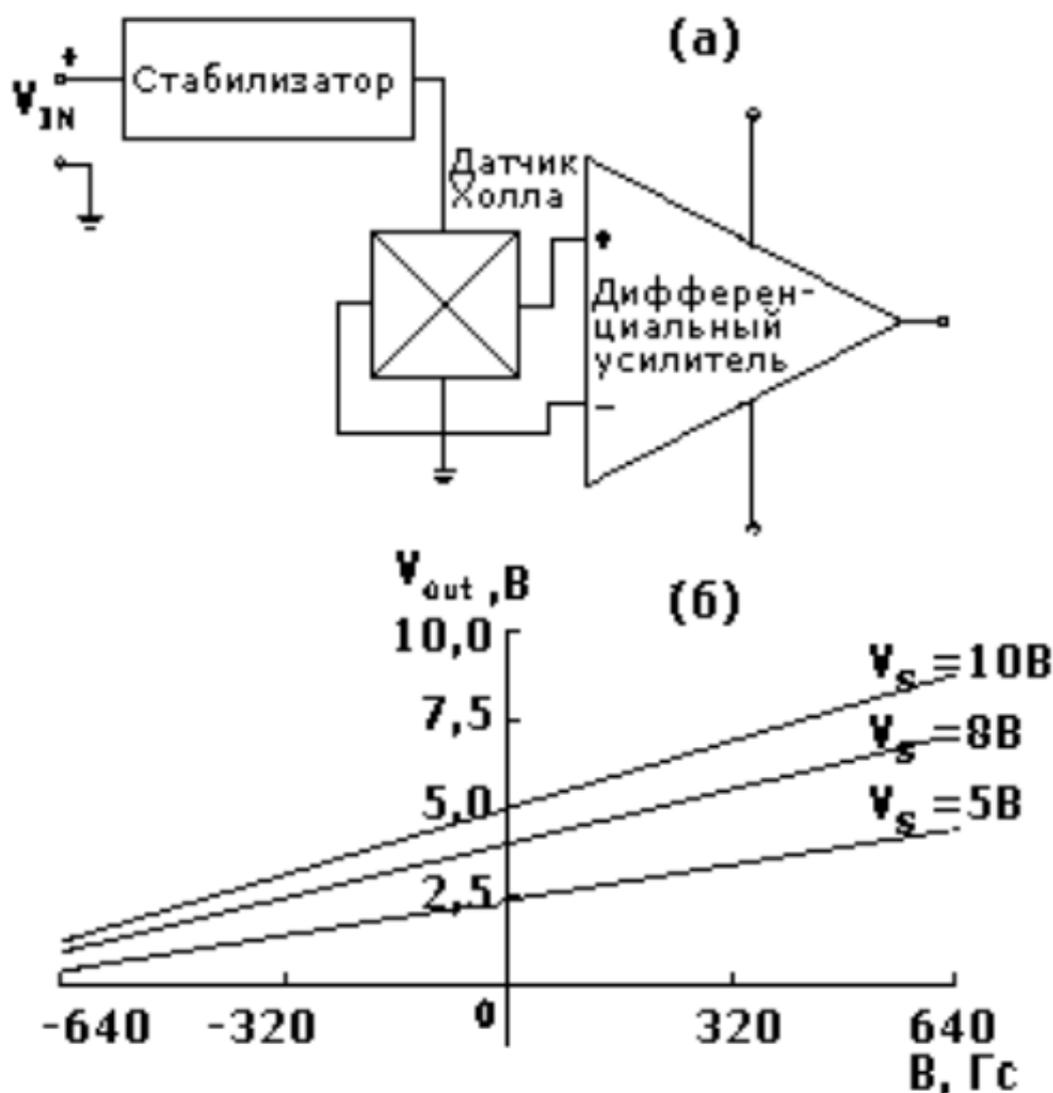


Рисунок 33 – Схема ИМС линейного датчика Холла (а) и график его характеристики преобразования (б)

Современные технологии позволяют ввести в состав ИМС датчиков магнитного поля сложные цифровые системы обработки информации. Примером такой ИМС может служить HAL805 фирмы Micronas Intermetall, содержащий на кристалле в трёхвыводном корпусе ТО92 АЦП, ЦАП, ЦПС (цифровой процессор сигналов) и энергонезависимую память. Такая структура

позволяет программировать чувствительность и смещение датчика, осуществлять фильтрацию помех и механических возмущений.

Вторая группа включает в себя микросхемы компараторного типа с логическими уровнями напряжения на выходе. Эта группа более многочисленна в силу большего числа возможных применений. Микросхемы с логическим выходом делятся на две подгруппы: переключатели и триггеры. Униполярный переключатель срабатывает только при наличии магнитного поля одной полярности и гарантирует выключенное состояние в отсутствие магнитного поля; магнитное поле противоположной полярности не оказывает на него никакого влияния.

Биполярный триггер, напротив, реагирует на обе полярности: включается при приближении северного или южного полюсов магнита и выключается только в том случае, если поле с противоположным знаком достигнет определенного уровня. Термин «биполярный переключатель» обычно применяется к триггерам, реагирующим на пропадание поля [20].

Такие переключатели переходят во включённое состояние при наличии магнитного поля, а выключаются при снижении уровня той же полярности, отсутствии поля, или в присутствии поля с противоположным знаком. Наличие ступени гистерезиса, которая является разностью между величинами магнитного поля в точках включения и выключения, повышает помехозащищенность устройства. Логический двухвыводной датчик Холла HAL556 производит фирма Micronas Intermetall. Эта микросхема (см. рисунок 34) потребляет большой ток при приближении положительного полюса магнита к маркированной стороне корпуса и малый ток при удалении. HAL566 реализует обратные функции. Микросхемы имеют встроенную систему, увеличивающую напряжение, приложенное непосредственно к кристаллу датчика Холла, с тем чтобы сделать возможным применение недорогих постоянных магнитов, имеющих сравнительно малую коэрцитивную силу.

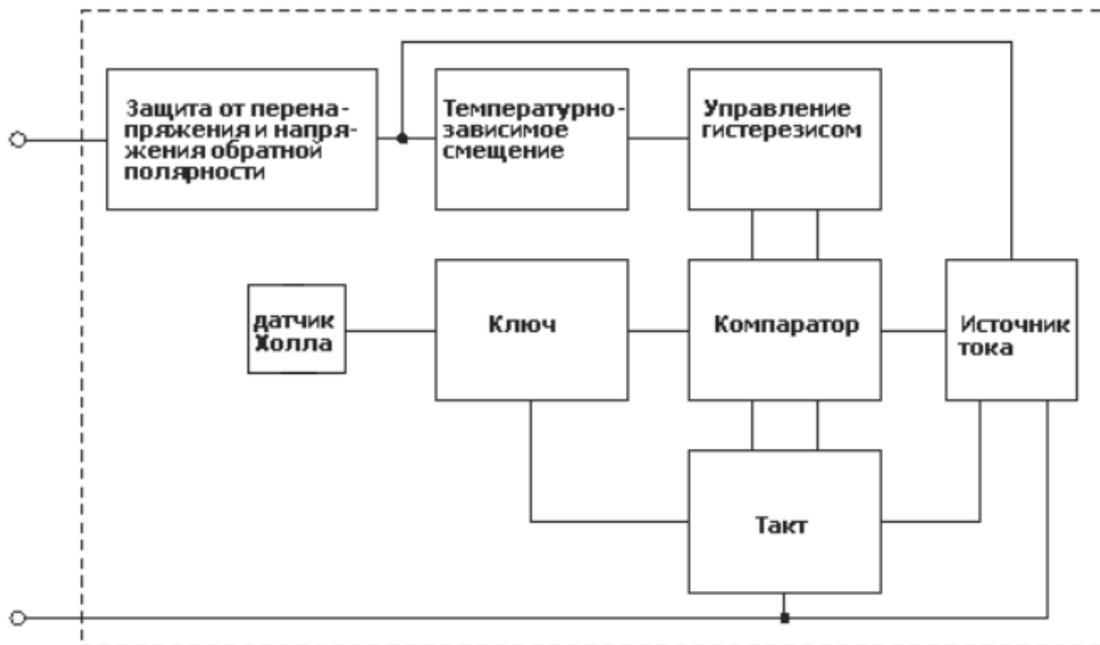


Рисунок 34 – Двухвыводной логический датчик HAL556

5.1.2 Основные характеристики датчиков Холла

Диапазон выхода линейных датчиков соответствует диапазону выходных напряжений, в котором нелинейность не выходит из заданных пределов. Определяется как часть напряжения питания. Диапазон измеряемой индукции, устанавливаемый изготовителем в гауссах или миллитеслах. Чувствительность, определяемая как крутизна характеристики преобразования в мВ/Гс или мВ/мТл. Погрешность линейной характеристики преобразования – отклонение статической характеристики преобразования датчика Холла от идеальной прямой линии в заданном диапазоне давлений. Указывается в процентах от полной шкалы. Напряжение нулевого положения магнитного поля – есть значение выходного напряжения, равное отсутствию магнитного поля. Температурный дрейф нуля – изменение напряжения нуля, вызванное повышением или понижением температуры. Указывается в процентном соотношении градусов от напряжения нуля, соответствующего 25°C. Температурный дрейф чувствительности – изменение чувствительности, вызванное изменением температуры. Указания в отношении процентного

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

отношения от температурных градусов Цельсия от напряжения полной шкалы, соответствующего 25°C. Время отклика, определяется как время изменения выходного сигнала от 10% до 90% установившегося значения его приращения при скачкообразном изменении магнитного поля. Полоса пропускания fS определяется по уровню снижения чувствительности на 3 дБ в режиме малого сигнала. Логические датчики Индукция включения – значение индукции, при которой происходит переход выходного напряжения датчика от низкого к высокому уровню. Индукция выключения – значение индукции, при которой происходит переход выходного напряжения датчика от высокого к низкому уровню. Гистерезис – разность между индукциями включения и выключения. Время переключения сигнала – определяется как время изменения выходного сигнала от 10% до 90% его установившегося значения при скачкообразном изменении индукции. Сертифицируется отдельно для нарастания и спада магнитного поля. Для двухвыводных датчиков сертифицируется ток потребления при низкой индукции (Н) и при высокой (В).

5.2 Индукционный датчик

Индукционные датчики предназначены для преобразования линейного или углового перемещения в изменение взаимной индуктивности между двумя или несколькими катушками.

На рисунке 41 приведена принципиальная схема индукционного преобразователя с двумя катушками. На магнитопроводе 1 расположены две катушки 2 (W1) и 3 (W2). К первичной обмотке W1 подводится напряжение переменного тока. При изменении магнитного сопротивления цепи R_m , например, при изменении зазора δ , изменится и взаимоиндукция M между катушками:

$$M = \frac{W1 \cdot W2}{R_m} \quad (121)$$

следовательно, изменится и напряжение во вторичной обмотке W2- напряжение датчика УД, т.е. $УД = f(\delta)$.

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

В индукционных датчиках, собранных по дифференциально-трансформаторной схеме и имеющих общую магнитную цепь для обмоток, измерительные обмотки W_1 и W_2 включаются последовательно и встречно, поэтому при нейтральном положении сердечника C или якоря $Я$ (измеряемый параметр равен нулю) выходной сигнал датчика $U_D = 0$.

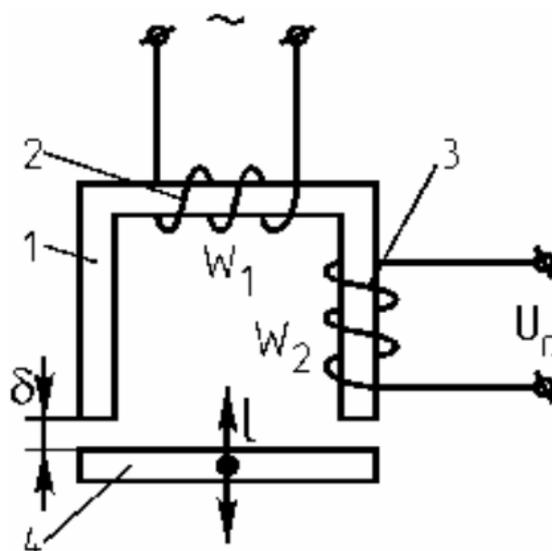


Рисунок 35 – Принципиальная схема индукционного преобразователя: 1- магнитопровод; 2- катушка (первичная обмотка W_1); 3- катушка (вторичная обмотка W_2); 4- ферромагнитный сердечник (пластина)

При смещении сердечника (или якоря) от нейтрали баланс магнитных потоков в измерительных обмотках нарушается, и это приводит к уменьшению напряжения на выходе одной измерительной обмотки и к увеличению напряжения на выходе второй измерительной обмотки. Алгебраическая их сумма и есть напряжение U_D , пропорциональное смещению сердечника (или углу поворота якоря).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

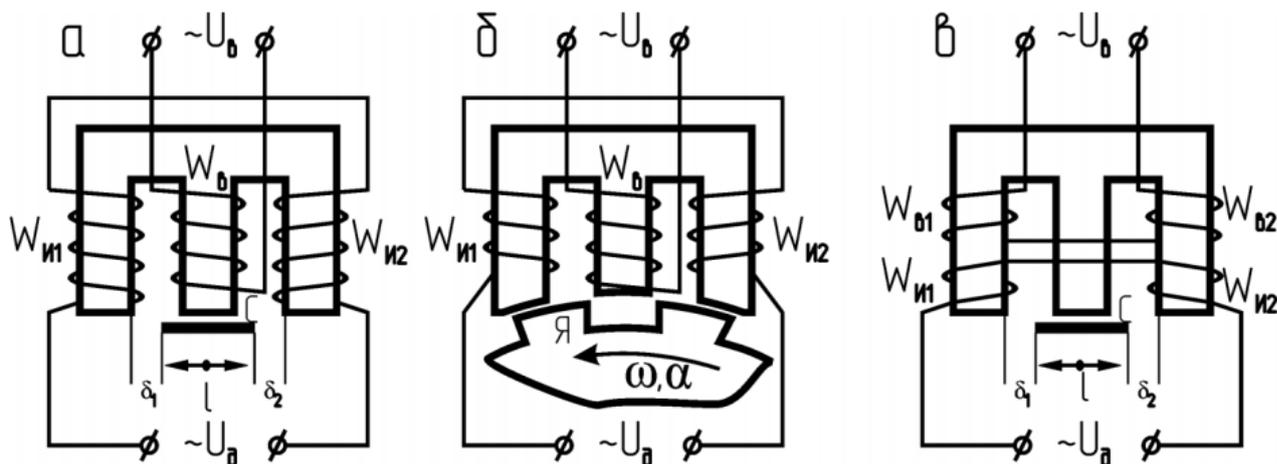


Рисунок 36 – Схемы включения индукционных датчиков

Схема б является разновидностью схемы, а, используется при вращательном движении якоря и может быть использована при разработке тахометров, а при преобразовании линейного перемещения в угловое может быть использована и для измерителя линейных скоростей, например, измерителя механической скорости бурения.

5.3 Выбранный тип датчика

Датчик Холла очень прост в своей конструкции, может быть установлен в рабочий зазор электрической машины, обеспечивает приемлемую точность измерения угла, имеет низкую цену, однако подвержен воздействию внешних магнитных сил в условиях жесткого радиационного излучения.

Потенциометрический датчик при простоте и дешевизне имеет малый ресурс, не обеспечивает требуемой надежности.

Вращающийся трансформатор может обеспечить очень высокую точность измерения угла, может быть выполнен бесконтактным, при этом от всех представленных датчиков имеет сложную конструкцию и очень высокую цену.

В данной работе будет выбран датчик Холла, установленный в рабочий зазор обмоток электродвигателя, такие датчики зарекомендовали себя как самые

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

надежные и простые в исполнении, а также способен сохранять работоспособность в условиях жесткого радиационного излучения.

Такие датчики относятся к измерительно-преобразовательной технике, а именно к индукционным бесконтактным датчикам угла, предназначенным для преобразователя угла поворота ротора в электрическое напряжение, и может найти применение в качестве первичного датчика информации в аналоговых и дискретных (цифровых) системах. Такие датчики находят применение как в космической технике, так и в военной.

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

6 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

В этом разделе на базе общих затрат, сопряженных с формированием междисциплинарного расчета и разработкой методических указаний очень важно высчитать полную себестоимость проекта.

Себестоимость определяется по формуле:

$$S = C_m + C_{зп} + C_{е.с.н.} + C_a + C_{пр} \quad (122)$$

где C_m — сырье и материалы; $C_{зп}$ —затраты на оплату труда; $C_{е.с.н.}$ — единый социальный налог; C_a — амортизация; $C_{пр}$ — прочие затраты.

В ВКР приведены расчеты материальных затрат.

Составлена смета затрат на разработку методических указаний:

- сырье и материалы;
- заработная плата рабочих;
- единый социальный налог;
- амортизация.

Таблица 11 – Затраты на разработку документации

Наименование продукции	Единица измерения	Количество	Сметная стоимость, руб
Лист бумаги А4	шт.	500	220,00
Картридж	шт.	1	250,00
Итого:			470,00

Оклад инженера, участвующего в разработке, составляет $O_{и} = 17000$ руб.

Разработка комплекса $T'_{рк}$

$$T'_{рк} = \frac{T_{рк}}{Д} \quad (123)$$

Где $T_{рк}$ — время, затраченное на разработку всего комплекса, дни; $Д$ — количество рабочих дней в месяце, $Д = 24$ д.

$$T'_{рк} = \frac{24}{31} = 0,77$$

Основная заработная плата инженера $C_{оз}$ составляет

$$C_{\text{оз}} = O_{\text{и}} \cdot T'_{\text{рк}}(1 + k_{\text{пояс}}), \quad (124)$$

где $k_{\text{пояс}} = 0.15$ – поясной коэффициент.

$$C_{\text{оз}} = 17000 \cdot 0.77 \cdot 1.15 = 15053 \text{ руб.}$$

Учитывается еще дополнительная заработная плата персонала $C_{\text{оз}}$:

$$C_{\text{дз}} = 0.1 \cdot C_{\text{оз}}, \quad (125)$$

$$C_{\text{дз}} = 0.1 \cdot 15054 = 1505 \text{ руб.}$$

Заработная плата состоит из основной заработной платы и дополнительной

$$З = 15054 + 1505 = 16558 \text{ руб.}$$

Отчисления в пенсионный фонд

$$O_{\text{пф}} = \frac{З \cdot P_{\text{пс}}}{100} \quad (126)$$

где $O_{\text{пф}}$ – размер отчислений в пенсионный фонд, руб.; $З$ – начисления заработной платы, руб.; $P_{\text{пс}}$ – процент отчислений в пенсионный фонд, $P_{\text{пс}} = 22\%$.

$$O_{\text{пф}} = \frac{16558 \cdot 22}{100} = 3643 \text{ руб.}$$

Отчисления в фонд социального страхования РФ рассчитывается по формуле:

$$O_{\text{сс}} = \frac{З \cdot P_{\text{сс}}}{100} \quad (127)$$

где $O_{\text{сс}}$ – размер отчислений в пенсионный фонд, руб.; $З$ – начисления заработной платы, руб.; $P_{\text{сс}}$ – процент отчислений в пенсионный фонд, $P_{\text{сс}} = 2.9\%$.

$$O_{\text{сс}} = \frac{16558 \cdot 2.9}{100} = 480 \text{ руб.}$$

Отчисления в фонд обязательного медицинского страхования рассчитываются по формуле:

$$O_{\text{мс}} = \frac{З \cdot P_{\text{рм}}}{100}, \quad (128)$$

где $O_{мс}$ – размер отчислений в пенсионный фонд, руб.; 3 – начисления заработной платы, руб.; $P_{сс}$ – процент отчислений в пенсионный фонд, $P_{сс} = 5.1\%$.

$$O_{мс} = \frac{16558 \cdot 5.1}{100} = 845 \text{ руб.}$$

Общая сумма отчислений на социальные нужды определяется по формуле

$$O_{ск} = O_{пф} + O_{сс} + O_{мс} \quad (129)$$

$$O_{ск} = 3643 + 480 + 845 = 4968 \text{ руб.}$$

Виды основных средств и нормы амортизационных отчислений представлены в таблице 5.2.

Таблица 12 – Виды основных средств и нормы амортизационных отчислений

Виды основных расходов	Годовая норма амортизационных отчислений	Балансовая стоимость i -той единицы основных фондов	Амортизационные отчисления
Принтер	14	5500	770
ПК	14	30000	4200
Итого			4970

Амортизационные отчисления по отдельным видам основных средств

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{C_{офи} \cdot H_{ai}}{100}, \quad (130)$$

где $C_{офи}$ – балансовая стоимость i -ой единицы основных средств, руб.; H_{ai} – годовая норма амортизационных отчислений %; n – число видов основных средств $n=3$.

$$A_{12} = \frac{5500 \cdot 14}{100} + \frac{30000 \cdot 14}{100} = 4970 \text{ руб.}$$

Оборудование эксплуатируется 1,4 мес., значит:

$$A_{12} = \frac{4970 \cdot 1.4}{100} = 580 \text{ руб.}$$

Смета затрат на разработку методических указаний междисциплинарного расчета приведена в таблице 5.3.

Таблица 13 – Виды основных средств и нормы амортизационных отчислений

Статьи затрат	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	470	0.73
Заработная плата	16558	67.82
Отчисления на социальные нужды	4968	22.38
Амортизация	580	0.8
Итого:	22570	100

Исходя из полученных данным можно сделать соответствующие выводы:

1. Инженер-проектировщик будет выполнять данный проект 24 дня;
2. Выше приведены расчеты материальных затрат на разработку данного проекта;
3. Составлена смета общих затрат на методические указания;

Затраты на электроэнергию, ПО, мелкую канцелярию не учитываются в данном расчете.

7 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Перед началом работы убедитесь в работоспособности сертифицированного монтажного инструмента и его соответствии предстоящей работе. Стержень паяльника не должен быть жестко скреплен с его ручкой, а ручка его не должна иметь трещин, провод питания не должен иметь нарушений изоляции.

Паяльные работы в блоках, стойках, шкафах, и других изделиях необходимо выполнять, только убедившись в полном снятии с них напряжения.

Паяльные станции обладают специальным надстроечным переключателем на подаче температуры на жало паяльника.

Монтажные работы на высоте свыше 1,5 метра должны производиться со специальных стремянок и лесов, обеспеченных лестницами, или с применением страховочных поясов. Перед использованием лестниц и предохранительных поясов необходимо убедиться в их исправности и отсутствии люфта в ножках.

Работы по монтажу и демонтажу изделий, связанные с опасностью засорения или ожога глаз припоем, следует выполнять в защитных очках.

При выполнении монтажных работ на металлических поверхностях в положениях лёжа, сидя и с колена должны использоваться маты или наколенники.

Монтаж в замкнутых сосудах или, междудонных отсеках и других местах должен производиться не менее чем двумя рабочими. В случае отсутствия приспособления для механического удаления припоя следует пользоваться пинцетом или оловоотсосом.

Для разогрева олова при пайке следует пользоваться специально предназначенным для этого феном.

Во избежание образования брызг при паяльных работах необходимо флюс наносить тонким слоем, а лишний припой с жала паяльника удалять специально предназначенными для этого салфетками или губкой [4].

Припаиваемый провод нужно придерживать пинцетом.

Паяльник в перерывах между пайкой следует держать на металлической или теплостойкой подставке либо в специально оборудованном для него месте.

Пользоваться химическими веществами, содержащимися в емкостях, разрешается только при наличии этикеток с указанием содержимого.

Зачистка концов провода методом обжига должна производиться только при включенной местной вентиляции определенного класса.

Детали перед их облуживанием в тигле должны быть хорошо просушены.

При использовании боковых кусачек откусывать провода следует в направлении от себя, а также применять экраны для защиты окружающих от отлетающих частиц.

Растворители (спирт, ацетон, бензин и другие горючие вещества), применяемые для промывки мест пайки, должны храниться в небьющейся таре, в стороне от паяльника.

При окончании работы необходимо:

Отключить паяльник и обжигающее устройство от электросети;

Обтереть инструменты и приспособления и убрать их в отведённые для этого места;

Очистить рабочее место от припоя, канифоли, протереть влажной салфеткой поверхность стола;

Салфетки и ветошь убрать в специально предназначенные для них ёмкости;

Остатки растворителей сдать в установленное место;

Сполоснуть руки однопроцентным раствором уксусной кислоты, затем вымыть их горячей водой с мылом, прополоскать рот и почистить зубы;

При пусконаладочных работах следует проверить все энергетические показатели;

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143.01. ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проектирования, была освоена научная литература отечественных авторов и зарубежных, произведен анализ возможных вариантов модернизации и оптимизации уже существующих электродвигателей и редукторов для управления поворотом рабочего органа на стабилизированной платформе.

Разработан двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, выполнен расчет его номинальных характеристик, в соответствие с ГОСТ 16264.2-85, произведён подбор необходимых материалов необходимых для сборки электродвигателя, измерительных датчиков и редуктора.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы, была составлена и предоставлена модель двигателя платы, а также её графические характеристики. Можно с уверенностью сказать, что представленная модель двигателя является оптимальной на сегодняшний день и отвечает всем заявленным требованиям к космическому аппарату. Так же в процессе проектирования были решены следующие задачи:

- Рассчитана необходимая мощность двигателя;
- Исходя из расчетных данных был выбран двигатель, представленный у производителя на сегодняшний день;
- Рассчитано необходимое передаточное число и выбран редуктор;
- Проведён анализ технической литературы и выбрана подходящая механическая передача;
- Разработана модель оптимального электродвигателя и построены его характеристики в ПО Ansys Electronics Desktop;
- Проведён анализ технической литературы и выбран датчика угла рабочего органа;
- Произведён экономический расчёт.

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. – 127 с.
2. Шумилов И.С. Системы управления рулями самолётов: учеб. пособие/ И. С. Шумилов. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 469 с.
3. Давыдов И.Е. Исследование характеристик электрогидравлической рулевой машины: методические указания/ И.Е. Давыдов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – 22 с.
4. Галлямов Ш.Р. Улучшение динамических характеристик рулевого привода летательного аппарата на основе имитационного моделирования/ Ш.Р. Галлямов. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2009. – 18 с.
5. Мотиенко Т.А. Прикладной метод синергетического синтеза иерархических систем управления летательными аппаратами: автореферат/ Т.А. Мотиенко – Таганрог: Изд-во ТТИЮФУ, 2011. – 20 с.
6. Копылов И.П. Проектирование электрических машин/ И.П. Копылов. – М.: Изд-во ЮРАЙТ, 2011. – 22 с.
7. Клиначёв Н.В., Маргацкая Е.А. Прецизионный электромагнитный привод для малых линейных перемещений рабочего органа // Моделирующая программа Jigrein: Теория, программа, руководство, модели. – 2006–2018 гг. – URL: <https://klinachevny.ru/Jigrein/JS/fwlink.htm#F4E3>.
8. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: конспект лекций/С.Г. Воронин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 114 с
9. Клиначёв Н.В. Юлдашева О.К. Расчёт электропривода системы ориентации солнечных батарей космического аппарата // Моделирующая программа Jigrein: Теория, программа, руководство, модели. – 2015. URL: https://klinachevny.ru/Jigrein/md_107.htm
10. Карточка двигателя серии ДБМ // ОАО «МАШИНОАППАРАТ» 2015 – http://mashap.maverick.ru/MenuVert/StatorNew/6_DBM40_0.04_5_3.html

11. Лифанов В.А. Расчет электрических машин малой мощности: учеб. пособие/. – В. А. Лифанов – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 164 с.
12. Гейтеинко Е.Н. Источники вторичного электропитания схемотехника и расчёт/ Е.Н. Гейтеинко. – М.: Изд-во СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с.
13. Профессор К.А. Основы электроники/ К.А. Профессор. – М.: Изд-во Государственное энергетическое издательство, 1946. – 320 с.
14. Николаенко М.Н. Самоучитель по радиоэлектронике/ М.Н. Николаенко. – М.: Изд-во NT Press, 2006. – 92 с.
15. Документация. Кремневые мощные переключательные МДП и БТИЗ Транзисторы для вторичных источников питания и силовой электроники.
16. Лифанов, В. А. Исследование электрических микромашин [Текст] учеб. пособие к лаб. работам В. А. Лифанов, Г. В. Помогаев ; Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Электромеханика и электромеханические системы ; ЮУрГУ. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2009. – 90.
17. Ахметжанов А.А. Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств/ Учебное пособие - М.: Энергия, 1975. - 287 с.
18. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием/ Соколовский Г.Г. – СПб: Изд-во Академия, 2006. – 272с.
19. Gawronski W.K., Parvin B. Radiotelescope Low Rate Tracking Using Dither// AIAA Journal of Guidance Control and Dynamics. Vol. 21 1998. P. 1111 – 1128.
20. Пушкарев М. Микросхемы для измерения тока. – М: Журнал компоненты и технологии №10, 2006. – 6 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перв. примен.

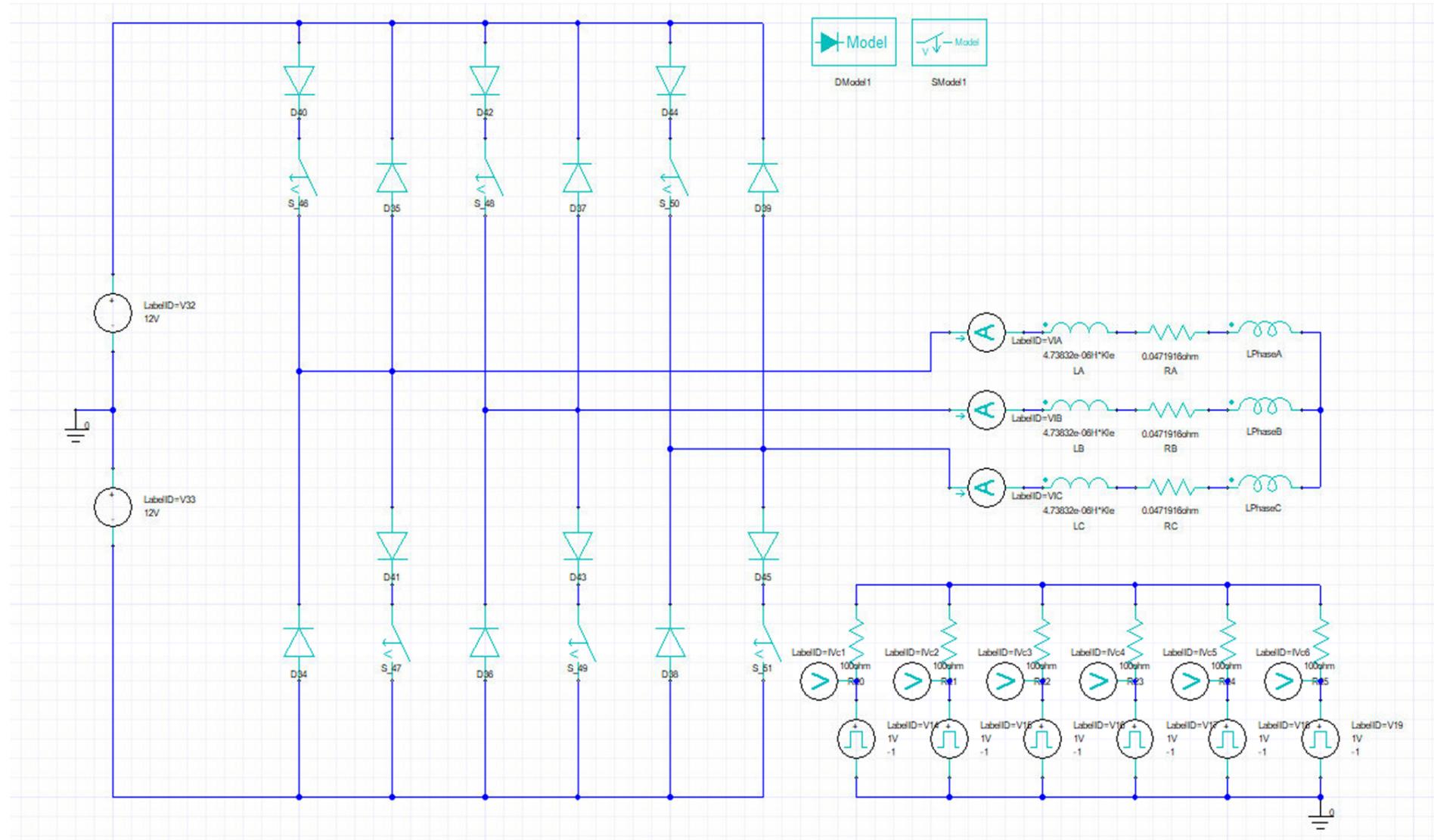
Справ. №

Подп. и дата

Взамен инв. №/инв. № дубл.

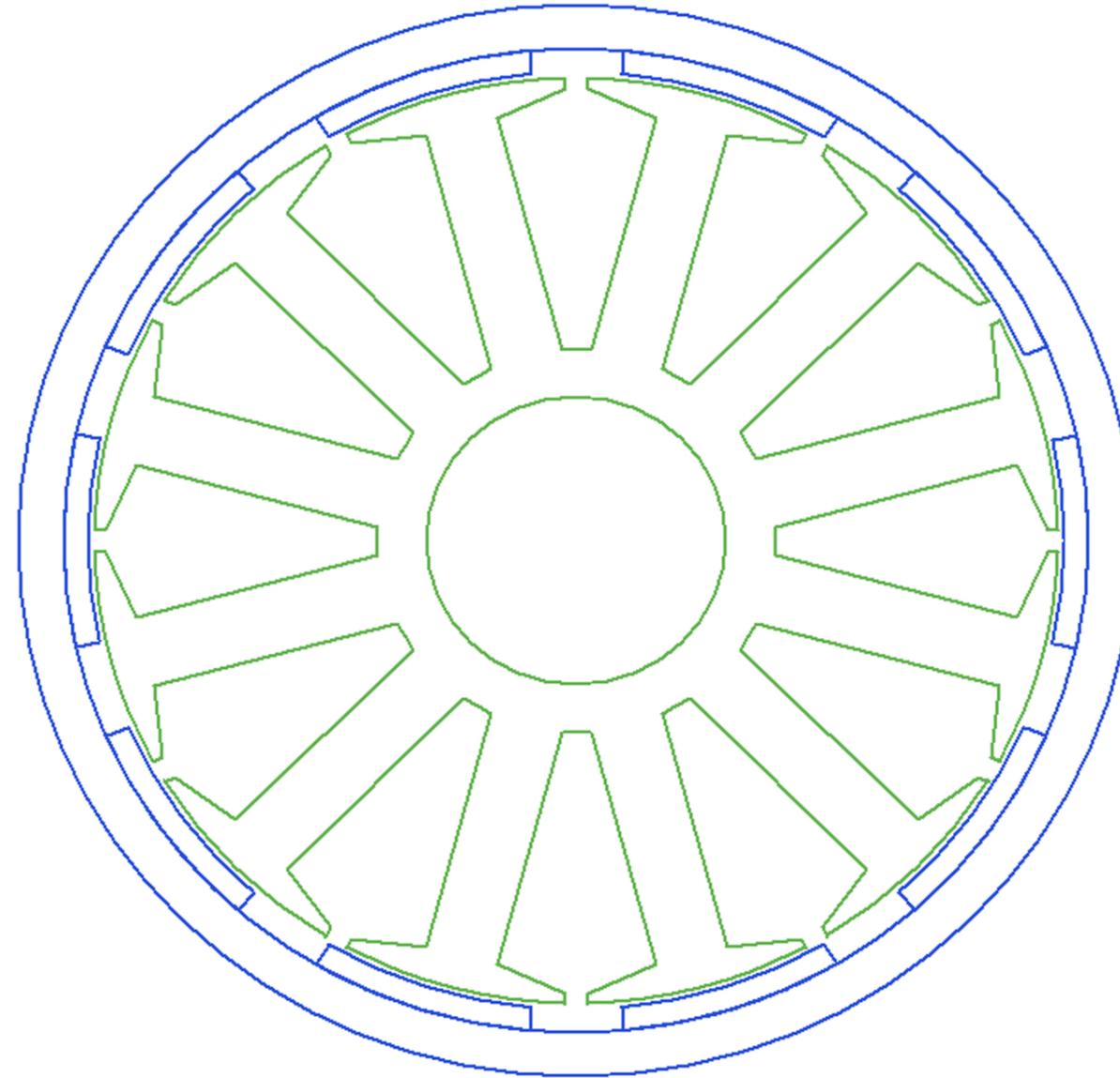
Подп. и дата

Инов. № подл.



					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143. 01				
Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Эскиз схемы замещения синхронного двигателя с постоянными магнитами			Лист	Масса	Масшт.
Разраб.	Ахмедьянов Д.З.						Д		1:1
Проб.	Созрин А.И.						Лист 86	Листов 1	
Н. контр.	Шабуров П.О.			ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"					
Утв.	Федоров В.Б.								

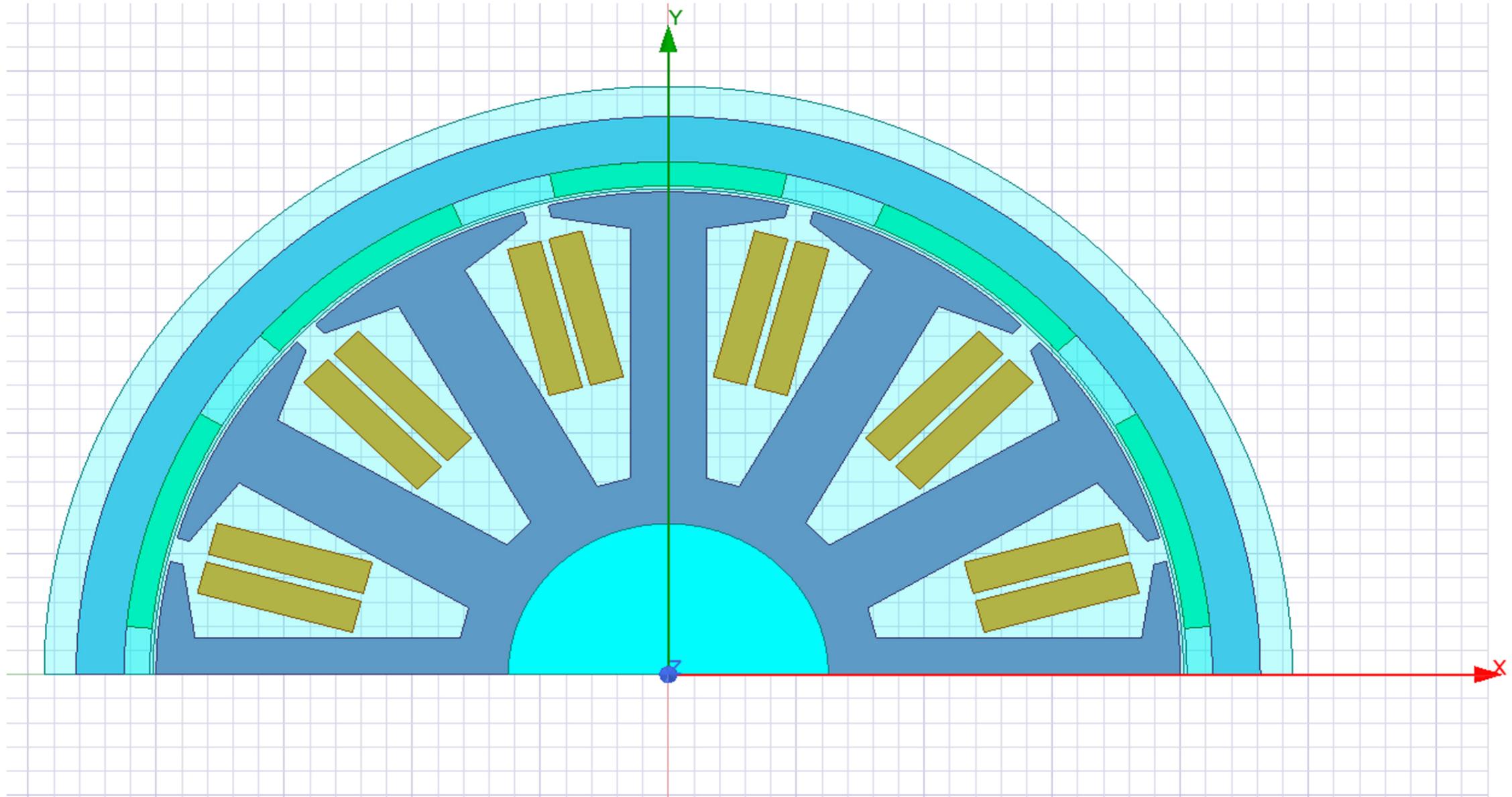
ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Перв. примен.	
Справ. №	
Подп. и дата	
Взамен инв. №/инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инов. № подл.	

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143. 01				
Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Эскиз синхронного двигателя с постоянными магнитами			Лит.	Масса	Масшт.
Разраб.	Ахмедьянов Д.З.						Д		1:1
Проб.	Созрин А.И.						Лист 87		Листов 1
Н. контр.	Шабуров П.О.			ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"					
Утв.	Федоров В.Б.								

ПРИЛОЖЕНИЕ В



Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Взамен инв. №/Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл.

					ЮУрГУ – 13.04.02. 2020 143. 01		
Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Эскиз модели синхронного двигателя с постоянными магнитами в 2D	Лист	Масса	Масшт.
Разраб.	Ахмедьянов Д.З.				Д		1:1
Проб.	Созрин А.И.				Лист 88	Листов 1	
Н. контр.	Шабуров П.О.			ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"			
Утв.	Федоров В.Б.						