

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Факультет «Аэрокосмический»  
Кафедра «Летательные аппараты»  
Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой.  
д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_/ Дегтярь В.Г./  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД РУЛЕВОЙ МАШИНЫ ДВИГАТЕЛЯ  
СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ - 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР: д.т.н., проф.  
\_\_\_\_\_/ Воронин С.Г./  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы:  
студент группы П-428  
\_\_\_\_\_/ Бойков В.Д./  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## АННОТАЦИЯ

Бойков В.Д. Электрический привод рулевой машины двигателя системы ориентации. – Челябинск: ЮУрГУ, П-428, 82 с., 36 ил., 5 табл., библиогр. список – 17 наим.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, шести глав, которые поделены на параграфы, заключения и списка используемой литературы.

Цель – основываясь на современных технологиях в авиационно-космической промышленности, разработать силовой рулевой привод системы ориентации, на основе изменения вектора тяги ракетного двигателя.

Задача – проанализировать разновидности рулевых приводов, выбрать наиболее подходящий тип привода для представленной цели. Определиться с его динамическими свойствами и параметрами. Произвести расчёт под требуемые параметры исполнительного вентильного двигателя, провести моделирование системы, а потом оптимизацию и подтвердить правильность расчётов. Далее произвести настройку контуров регулирования скорости и положения. Разработать блок электронной аппаратуры управления приводом, провести исследование схемотехнических решений для оптимизации электрической схемы.

Поставленная цель и рассматриваемые в работе задачи актуальны, так как такой подход к проектированию системы ориентации ещё не применялся в отечественных разработках.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Бойков В.Д.</i>			<i>Электрический привод рулевой машины двигателя системы ориентации</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Воронин С.Г.</i>					6	82
<i>Реценз</i>						<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шабуров П.О.</i>				<i>Летательные аппараты</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Дегтярь В.Г.</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>9</b>
<b>1. РУЛЕВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РУЛЕВОЙ ПРИВОД.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3. МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РУЛЕВЫЕ ОРГАНЫ.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4. ТРЕБОВАНИЯ К ДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ РУЛЕВЫХ ОРГАНОВ .....</b>	<b>20</b>
<b>2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ РЕДУКТОРА.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. УСТРОЙСТВО РЕДУКТОРА В РАЗРАБАТЫВАЕМОМ ПРИВОДЕ.....</b>	<b>31</b>
<b>3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИГАТЕЛЯ.....</b>	<b>49</b>
<b>4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИВОДА.....</b>	<b>50</b>
<b>5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА .....</b>	<b>57</b>

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

<b>5.1.</b>	<b>НАСТРОЙКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2.</b>	<b>НАСТРОЙКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА .....</b>	<b>64</b>
<b>6.</b>	<b>РАЗРАБОТКА БЛОКА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ.....</b>	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ БЛОКА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ .....</b>	<b>71</b>
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>80</b>
	<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>81</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Россия, является одним из лидеров в сфере космонавтики. Космос — это научные исследования, развитие технологий, а также пилотируемые полеты к другим планетам. Всё вышперечисленное определяет важность исследований в этом направлении, особенно в то время, когда околоземная орбита стала частью информационной инфраструктуры планеты.

Для участия в освоении полезного орбитального пространства, используется космическая техника, которая доставляет исследовательскую аппаратуру к месту назначения. Космической техникой являются абсолютно все космические аппараты, в том числе спутники, космические телескопы, межпланетные автоматические станции, орбитальные станции, а также оборудование, которое на них расположено, ракеты-носители, шаттлы и спускаемые аппараты [1].

ЮУрГУ, будучи национальным исследовательским университетом, тоже участвует в научной деятельности связанной с освоением космоса. Политехнический институт занимается разработкой ракетно-космического комплекса с полностью многоразовой ракетой-носителем и универсальной космической платформой. Управление всей этой техникой будет осуществляться, в том числе рулевыми приводами.

Рулевые приводы предназначены для перемещения и поворота органов управления и чаще всего представляют собой достаточно сложные замкнутые автоматические системы, относящиеся к классу силовых следящих приводов [2].

Поскольку на современных летательных аппаратах имеется большое количество разнообразных исполнительных механизмов и агрегатов, то в качестве источников механической энергии применяются гидравлические, пневматические и электрические приводы [2].

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Наиболее универсальным из них считается электрический привод благодаря высокой надёжности, совместимости с энергосистемой КЛА, простоте в эксплуатации и возможности автоматизации. Преимущество электрических приводов, в частности исполнительных электромеханизмов по сравнению с пневмо- и гидроприводами, оказывается особенно ощутимым при сравнительно невысоких значениях потребляемой мощности на выходном валу [2].

К электроприводу в первую очередь предъявляются следующие технические требования [2]:

- а) требования по надёжности,
- б) быстродействие,
- в) энергетическая эффективность,
- г) качество,
- д) точность,
- е) совместимость.

При проектировании электропривода в качестве типа исполнительного органа был выбран вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, с использованием векторного управления. Устройство и принцип работы вентильного двигателя более подробно будут рассмотрены далее.

В данной выпускной квалификационной работе основополагающей задачей является разработка привода рулевой машины, осуществляющей поворот сопла ракетного двигателя при управлении положением космического аппарата по одной из осей ориентации.

# 1. РУЛЕВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

## 1.1 Электрический рулевой привод

Во введении было отмечено, что разрабатываемый электропривод будет исполнительным органом системы ориентации универсальной платформы, в частности отвечающим за изменение направления вектора тяги рулевого двигателя.

Поскольку на современных летательных аппаратах имеется большое количество разнообразных исполнительных механизмов и агрегатов, то в качестве источников механической энергии применяются приводы [2]:

- а) электрогидравлические,
- б) электропневматические,
- в) электрические.

Наиболее универсальным из них считается электрический привод благодаря высокой надёжности, простоте в эксплуатации и возможности автоматизации. Преимущество электрических приводов, в частности исполнительных электромеханизмов, по сравнению с пневмо- и гидроприводами, оказывается особенно ощутимым при сравнительно невысоких значениях потребляемой мощности на выходном валу. В этом случае применение электрических исполнительных устройств оказывается более выгодным как по энергетическим, так и по объёмно-массовым показателям [2].

При подборе материала перед проектированием учитывались современные тенденции в ракетостроении и успешные проекты, реализованные на электродвигателях. В частности речь идёт про ракетополетель Electron, в блоке двигателей, ориентации которого используются электрические машины рисунок 1.1 [3].

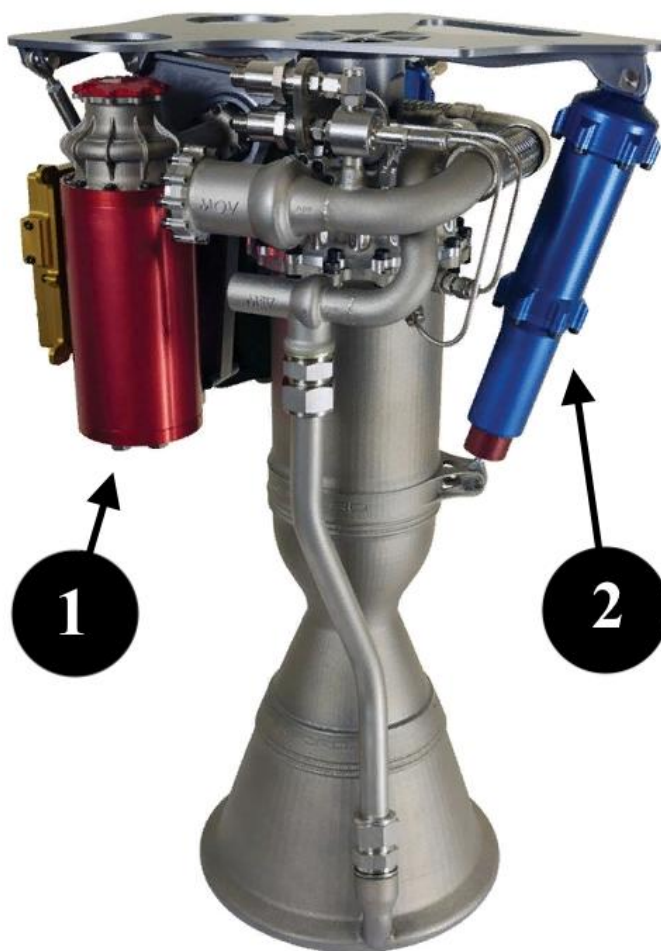


Рис. 1.1 - Двигатель Rutherford

1. Турбокомпрессор подачи топлива.
2. Электрическая рулевая машина с шарико-винтовой передачей.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР

Лист

12



## 1.2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Рулевые приводы предназначены для перемещения и поворота органов управления и чаще всего представляют собой достаточно сложные замкнутые автоматические системы, относящиеся к классу силовых следящих приводов рисунок 1.2 [2].

Электрический привод – система, которая, состоит из:

- а) блок электронной аппаратуры – в этом блоке осуществляется управление бесколлекторным двигателем;
- б) двигатель является основным элементом привода и в наибольшей степени определяет его регулировочные характеристики, динамические свойства и энергетические показатели. Правильный выбор двигателя позволяет спроектировать электропривод, способный успешно решать поставленные задачи, удовлетворяющий перечисленным выше требованиям технического задания [4];
- в) редуктор электродвигателя – при его помощи увеличивается или уменьшается скорость вращения;
- г) рабочий орган – реализует подведенную энергию в полезную работу. Рабочий орган характеризуется инерционностью, усилием при линейном движении [4];
- д) датчик скорости - датчик, который ответственен за выработку сигналов измерительной информации, ее передачу, дальнейшее преобразования и обработку блоком электронной аппаратуры;
- е) датчик угла - устройство, которое служит для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в цифровые или аналоговые сигналы, позволяющие определить угол его поворота.

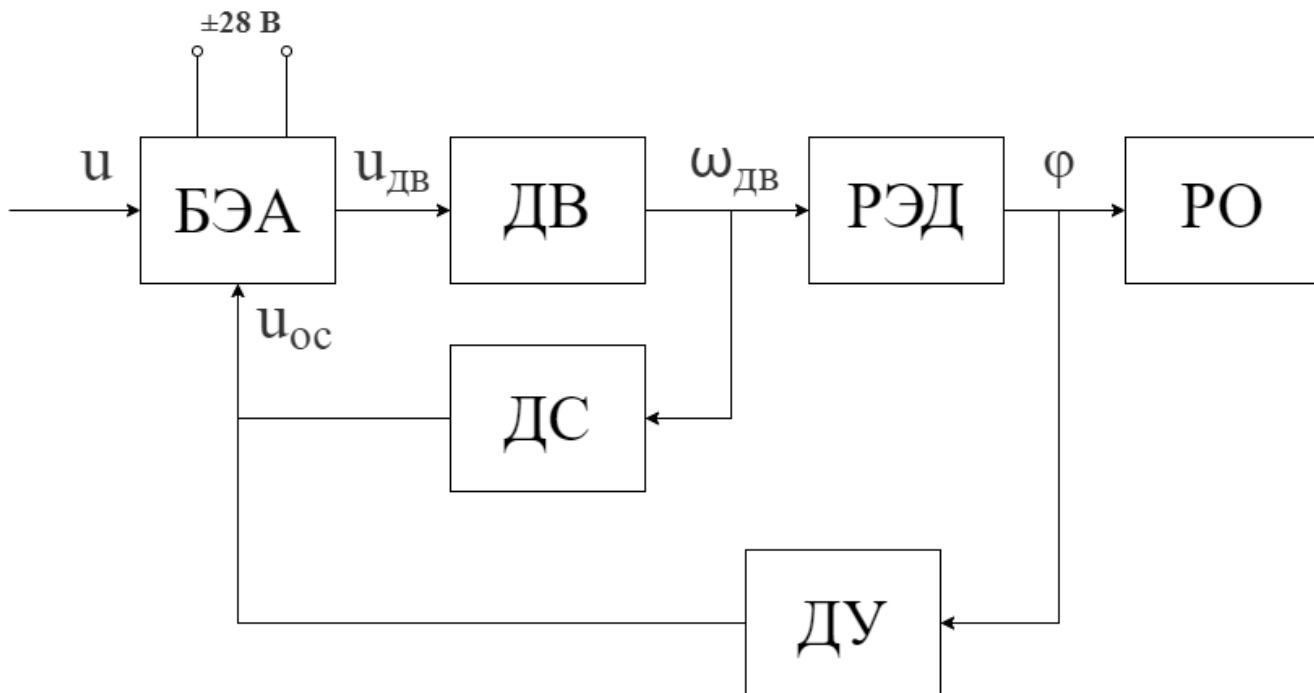


Рис. 1.2 - Функциональная схема электропривода

1. БЭА – блок электронной аппаратуры.
2. ДВ – двигатель.
3. РЭД – редуктор электродвигателя.
4. РО – рабочий орган.
5. ДС – датчик скорости.
6. ДУ – датчик угла.
7.  $u$  – сигнал управления двигателем [В].
8.  $u_{дв}$  – напряжение двигателя [В].
9.  $u_{ос}$  – напряжение обратной связи [В].
10.  $\omega_{дв}$  – скорость вращения ротора двигателя [рад/с].
11.  $\varphi$  – угол поворота рабочего органа [рад].

Достоинствами электрических приводов являются [2]:

- а) высокий коэффициент полезного действия, который достигает в некоторых образцах почти 90 %,
- б) высокие динамические характеристики, которые позволяют создавать следящие приводы с широкой полосой пропускания.

Среди недостатков отмечают [2]:

- а) необходимость иметь дополнительный источник электрической энергии большой ёмкости,
- б) сложность обеспечения больших управляющих моментов, порядка нескольких десятков килоньютонов,
- в) из-за наличия трения в коллекторных двигателях происходит нечувствительность двигателя к малым сигналам,
- г) использование таких приводов в летательном аппарате ограничивает высоту их применения.

Так как недостатки электрических машин устраняются применением бесколлекторной архитектуры, то выбор электрического привода становится ещё более целесообразным, в сравнении с электрогидравлическим и электропневматическим.

На рисунке 1.3 представлена 3D модель предполагаемого устройства всей электрической машины без корпуса, в котором она представлена на рисунке 1.2. Внутри корпуса все составляющие в соответствии с описанием функциональной схемы электропривода, только БЭА размещён отдельно от механики. Антивибрационные муфты предназначены для защиты электропривода от вибрации, возникающей в результате работы присоединенного к нему ракетного двигателя. Помимо этого антивибрационные муфты компенсируют изгибы в разрешенных пределах, а также оберегают привод и присоединенное к нему оборудование от повреждений [5].



Рис. 1.3 - Модель электропривода и рабочего органа

Системой, в которой будет функционировать разрабатываемый электропривод, является карданов подвес системы ориентации маршевого двигателя рисунок 1.4. Разрабатывалось совмещение управление маршевым двигателем и система ориентации на полном подвесе. Меняя положение рам подвеса, изменяем направление вектора тяги ракетного двигателя. В данной работе проектируется привод меньшей мощности под номером 7, который крепится к внешней раме подвеса.

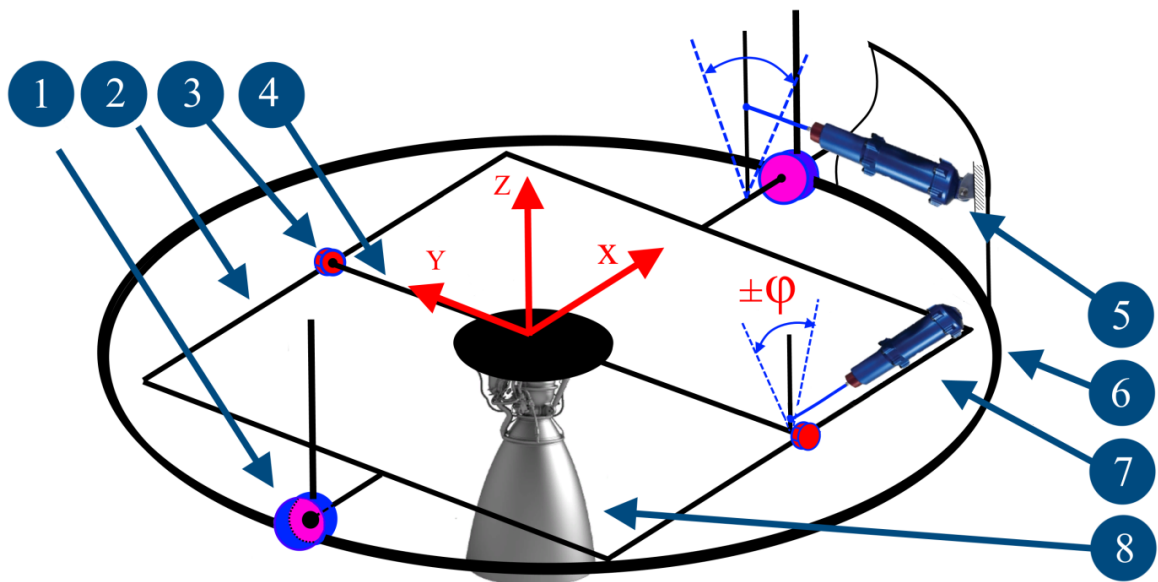


Рис. 1.4 – Кинематическая схема карданова подвеса ракетного двигателя с двумя степенями свободы

В соответствии с рисунком 1.4 перечислены элементы системы:

1. Подшипник подвеса внешней рамы.
2. Внешняя рама карданова подвеса.
3. Подшипник подвеса внутренней рамы.
4. Внутренняя рама и её ось вращения.
5. Двигатель рулевой машины для поворота сопла ракетного двигателя относительно корпуса летательного аппарата, по оси Y.
6. Корпус летательного аппарата.
7. Двигатель рулевой машины для поворота сопла ракетного двигателя относительно внешней рамы, по оси X.
8. Ракетный двигатель.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

### 1.3. МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РУЛЕВЫЕ ОРГАНЫ

Для повышения быстродействия рулевого привода необходимо увеличение скорости перестановки рулей, а рост скоростей полёта приводит к увеличению усилий, необходимых для установки органов управления ЛА.

При расчёте механической части были рассмотрены моменты, которые действуют на исполнительный орган - ракетный двигатель, и выделены из них три основных. Для дальнейших расчётов моменты были аппроксимированы выражениям, через которые рассчитываются значения этих величин.

Первым рассматривается шарнирный момент  $M_{ш}$ , который пропорционален углу поворота рабочего органа  $\varphi$ , в расчетах допускается, что момент линейно зависит от угла.

Шарнирный момент  $M_{ш}$  – момент аэродинамических сил, который оказывает непосредственное влияние на органы управления относительно их осей вращения. Если шарнирный момент является положительным (как в данном случае), то он стремится отклонить руль в положительном направлении.

Демпферный момент  $M_{дм}$  – это такой момент, который возникает от перемещения тела в жидкости. Этот момент пропорционален скорости вращения или линейного перемещения. Так же, как и момент сухого трения, меняет свой знак при изменении направления движения. Момент демпфирования пропорционален скорости перемещения рабочего органа.

Момент сухого трения  $M_{ст}$  (он же реактивный момент) – это такой момент, который происходит от сжатия разных тел (в основном аморфных), разного рода резания и трения. Он характеризуется переходом от состояния покоя к движению. В данном методе расчёта  $M_{ст}$  моделируется релейным элементом. Меняет знак при изменении движения привода.

Для более точного отражения влияния нагрузки на общий характер переходных процессов, как принято при моделировании исполнительных органов летательных аппаратов, все три рассмотренных момента сводятся в одно выражение – момент сопротивления  $M_c$  [6].

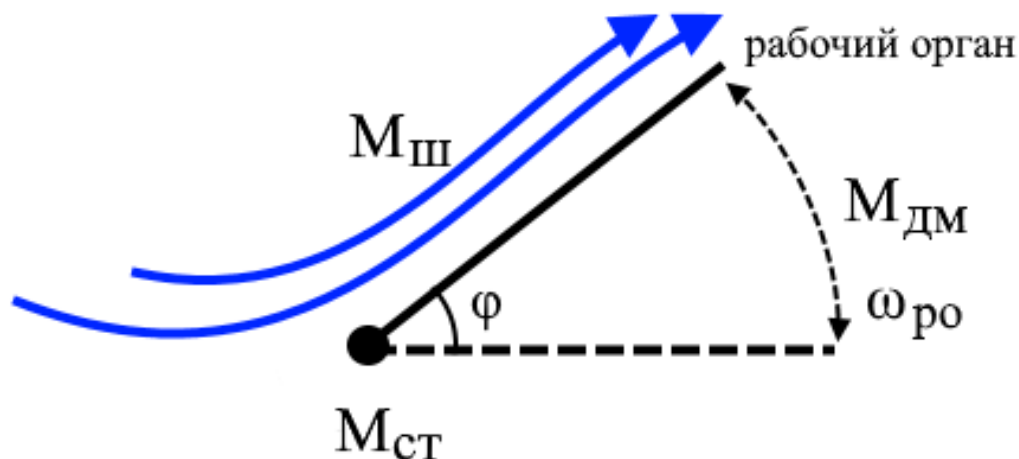


Рис. 1.5 - Приближённая модель принятых моментов, отражающих сопротивление

Приближённо допускается, что модель перемещения сопла ракетного двигателя, это модель перемещения рабочего органа по типу крыла рисунок 1.5. В таком случае шарнирный момент  $M_{ш}$  пропорционален углу поворота рабочего органа, в том смысле, что чем более угол близок к перпендикуляру относительно движения воздушной массы, тем большая сила прикладывается к крылу, чем менее близок к перпендикуляру, тем его легче перемещать. Принятая модель показывает, что момент демпферный  $M_{дм}$  пропорционален скорости перемещения рабочего органа, ведь чем быстрее перемещается крыло, тем сильнее ему препятствует окружающая его среда, основываясь на гидродинамике. Момент сухого трения  $M_{ст}$  отражает механические потери в движении системы рабочего органа, чем сильнее фиксируются механизмы, во избежание люфтов и дребезжания, тем он больше.

## 1.4. ТРЕБОВАНИЯ К ДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ РУЛЕВЫХ ОРГАНОВ

Величину полосы пропускания системы наведения  $\omega_{сн}$  определяет ширина амплитудно-частотного спектра управляющих воздействий  $\omega_{фв}$ . Система наведения должна достаточно точно реагировать на управляющие воздействия. Для этого требуется то, чтобы полоса пропускания  $\omega_{п.пр.}$  была больше, чем полоса основных частот управляющего воздействия.

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 во время наведения и стабилизации летательного аппарата. Рассмотрим следующее условие:

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{сн}} \geq 3 \quad (1.1)$$

Данное выражение соответствует следующему условию: если система стабилизации вносит в систему наведения фазовые искажения, которые не превышают  $15^\circ$ , а искажения по амплитуде не более 10%.

Однако, с другой стороны, полоса пропускаемых частот системы стабилизации должна быть больше собственных частот  $\omega_{ла}$  короткопериодических колебаний летательного аппарата, который находится в системе стабилизации как объект управления. Поэтому, если это условие не будет выполнено, то система стабилизации будет не в состоянии полностью использовать маневренные возможности летательного аппарата. Отсюда вытекает, что система стабилизации обладает достаточным быстродействием при выполнении следующего условия:

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{ла}} \geq 2 \quad (1.2)$$



Из-за того, что увеличивается полоса пропускания системы стабилизации, существенно усиливается влияние малых параметров элементов системы на её динамические свойства. Это сильно усложняет обеспечение устойчивости контура стабилизации.

Немалой важностью для рулевого привода играет точность. Для того, чтобы она была в достаточной степени, полоса пропускания рулевого привода  $\omega_{п.пр.}$  должна быть в  $K_B$  раз больше полосы частот системы стабилизации:

$$\omega_{п.пр.} > K_B \cdot \omega_{ст} \quad (1.3)$$

–  $K_B$  - коэффициент требуемого быстродействия рулевого привода.

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. Если увеличить эту полосу хотя бы в 1,5 раза, то придётся идти на серьёзное усложнение схемы привода и увеличение его мощности. А увеличение мощности приведёт к тому, что придётся увеличить размеры источников энергии, которые по габаритным размерам и массе значительно больше, чем собственно рулевой привод. Все эти факторы влияют на выбор величины полосы пропускания привода.

Значение коэффициента  $K_B$  зависит от многих факторов: типа летательного аппарата, принятого способа наведения, быстродействия системы стабилизации, рассматриваемого канала управления. Поэтому значение данного коэффициента не могут быть однозначными. Ориентировочно можно считать выполнимым условием:

$$\frac{\omega_{п.пр.}}{\omega_{ст}} \geq 3 \dots 3.5 \quad (1.4)$$

По предварительным расчётам полоса пропускания системы стабилизации принята  $\omega_{ст}=6$  рад/с, а полоса пропускания рулевого привода принята  $\omega_{п.пр.}=20$  рад/с, что укладывается в требований к быстродействию рулевого привода.

Главной мерой точности привода как динамического исполнительного устройства в режиме стабилизации является величина фазовых искажений  $\Delta\psi_{пр.}$ , вносимых приводом в контур стабилизации.

В современном мире развитие высокоманёвренных летательных аппаратов ведёт к тому, что частоты  $\omega_{ла}$  и  $\omega_{ст}$  всё время растут. Отсюда следует, что рулевой привод оказывает всё более сильное влияние на динамику системы стабилизации, ухудшая её устойчивость. Поэтому умение правильно оценить динамические свойства привода становится всё более актуальным [2].

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА

Для проектирования электропривода будут использоваться следующие исходные параметры, полученные разработчиками систем управления летательными аппаратами в результате расчёта динамики [6,2].

Принимаются конкретные значения  $\mu$  и  $\eta$ , которые в последующем уточняются. Ещё только предстоит рассчитать оптимальное передаточное значение редуктора, но точно известно, что для редукторов такого класса, КПД не менее 90%, а для приводов с высокими динамическими свойствами отношение момента статической нагрузки к моменту двигателя порядка 0.1.

Таблица 2.1. - Исходные данные и принятые допущения привода

Наименование	Обозначение	Значение
коэффициент шарнирной нагрузки	$k_{ш}$	21 Н·м/рад
коэффициент скоростного демпфирования манипулятора	$k_f$	0.9 Н·м/с
максимальное значение момента сухого трения	$M_{ст}$	27 Н·м
момент инерции рабочего органа	$J_{po}$	0.5 кг·м <sup>2</sup>
максимальное отклонение рабочего органа	$\varphi$	0.4 рад
минимальное время отработки задания	$t_0$	0.1 с
амплитуда гармонического сигнала	$\Delta_\alpha$	0.1 рад
полоса пропускания	$\omega_{п.пр.}$	20 рад/с
величина фазовых искажений	$\Delta\psi_{пр.}$	30°
напряжение питания	$U_{пит}$	28 В
коэффициент полезного действия редуктора	$\eta$	0.9
переменная равная отношению момента статической нагрузки к моменту двигателя	$\mu_{зад}$	0.1

С повышением быстродействия систем управления скоростных высокоманевренных ЛА рулевой привод оказывает всё более сильное влияние на динамику системы управления. В этом случае рулевой привод не может рассматриваться как безынерционный элемент системы управления даже на первоначальных этапах её проектирования и расчёта. В связи с этим возникает необходимость аппроксимации динамических свойств рулевого привода возможно более простыми передаточными функциями, но достаточно точно отображающими его динамику [2].

В предыдущей главе в общих чертах были описаны моменты, действующие на рулевые органы, в этой главе они будут разобраны и рассчитаны. Первым рассчитывается значение шарнирного момента  $M_{ш}$ , которое принято пропорциональным углу поворота рабочего органа [6]:

$$M_{ш}^{max} = k_{ш} \cdot \varphi \quad (2.1)$$

Так как данный момент переменный, будет использовано его среднее значение. При подстановке величин  $k_{ш}$ ,  $\varphi$  из таблицы 2.1, получено следующее выражение:

$$M_{ш}^{cp} = M_{ш}^{max} \cdot 0.5 = 21 \cdot 0.4 \cdot 0.5 = 4.2 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.2)$$

Далее находится значение момента демпфирования  $M_{дм}$ , который принят пропорциональным скорости вращения [6]:

$$M_{дм}^{max} = k_f \cdot \omega_{po.max} \quad (2.3)$$

$$\omega_{po.max} = \frac{2 \cdot \varphi}{t_0} \quad (2.4)$$

–  $\omega_{po.max}$  – максимальное значение скорости рабочего органа, рад/с.

Так как данный момент переменный, будет использовано его среднее значение. При подстановке величин  $k_f$ ,  $\varphi$ ,  $t_0$  из таблицы 2.1, получено следующее выражение:

$$\omega_{po.max} = \frac{2 \cdot 0.4}{0.1} = 8 \text{ рад/с} \quad (2.5)$$

$$M_{дм}^{cp} = M_{дм}^{max} \cdot 0.5 = 0,9 \cdot 8 \cdot 0.5 = 3.6 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.6)$$

Момент сухого трения  $M_{ст}=27$  Нм, моделируется релейным элементом. Данные взяты из таблицы 2.1.

Для более точного отражения влияния нагрузки на общий характер переходных процессов, как приятно при моделировании исполнительных органов летательных аппаратов, все три рассмотренных момента сводятся в одно выражение – момент сопротивления на валу рабочего органа  $M_c$  [1].

$$M_c = M_{ш}^{cp} + M_{дм}^{cp} + M_{ст} \quad (2.7)$$

$$M_c = 4.2 + 3.6 + 27 = 34.8 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.8)$$

## 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Для оценки параметров исполнительного двигателя, необходимо, чтобы были известны численные значения важных конструктивных соотношений, которые берутся из общей теории электрических машин и из практики проектирования двигателей с возбуждением от постоянных магнитов [6].

Таблица 2.2. - Номинальные параметры двигателя

Наименование	Обозначение	Значение
коэффициент формы кривой индукции воздушного зазора	$k_B$	1.11
отношение длины ротора к его диаметру	$\lambda$	2
линейная нагрузка якоря	$A$	$20 \cdot 10^3 \frac{A}{m}$
коэффициент полюсного перекрытия	$\alpha_\delta$	0.7
обмоточный коэффициент	$k_{o\delta}$	0.94
амплитуда индукции воздушного зазора	$B_\delta$	0.8 Тл
плотность среднелегированной электротехнической стали	$\gamma$	$7800 \frac{kg}{m^3}$

На основе данного выражения рассчитывается значение эквивалентного момента инерции  $J_{нэ}$ , отражающего влияние нагрузочного момента на скорость протекания механических переходных процессов [4].

$$J_{нэ} = J_{р0} + \frac{\mu_{зад} \cdot M_c \cdot t_0^2}{4 \cdot \varphi \cdot \eta} \quad (2.9)$$

При подстановке данных из таблицы 2.1, будет получено следующее значение:

$$J_{нэ} = 1 + \frac{0.1 \cdot 34.8 \cdot 0.01}{4 \cdot 0.4 \cdot 0.9} = 0.5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (2.10)$$

Момент инерции – это такая характеристика объекта, которая препятствует изменению его угловой скорости. В случае разгона двигателя инерционность нагрузки создает дополнительный момент сопротивления, который привод должен преодолеть, и ограничивает максимальные значения скорости и ускорения, при которых шаговый двигатель будет работать. В случае замедления и остановки момент инерции мешает торможению нагрузки.

Далее находится требуемая добротность  $D_{тр}$ , которая характеризует динамические свойства двигателя [6]. Физически добротность представляет удельную силу, которую развивает 1 килограмм массы ротора двигателя.

$$D_{тр} = \frac{\sqrt{J_{нэ}} \cdot 8 \cdot \varphi}{t_0^2} \quad (2.11)$$

$$D_{тр} = \frac{0.5 \cdot 8 \cdot 0.4}{0.01} = 231.6 \frac{\text{Н}}{\sqrt{\text{кг}}} \quad (2.12)$$

Следующей определяется требуемая мощность, так как рассчитывается двигатель постоянного тока, то  $P_{тр} = P_{эм}$ , а следовательно требуемая мощность является электромагнитной, уточнение сделано, чтобы потом не запутаться при расчётах электрических параметров исполнительного двигателя [6]:

$$P_{\text{тр}} = \frac{16 \cdot J_{\text{нэ}} \cdot \varphi^2}{t_0^3} \quad (2.13)$$

$$P_{\text{тр}} = \frac{16 \cdot 0.5 \cdot 0.16}{0.001} = 1340 \text{ Вт} \quad (2.14)$$

Так же, так как ресурсы на космическом аппарате ограничены и очень важна потребляемая энергия, требует расчёта потребляемая мощность  $P_{\text{потр}}$ :

$$P_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{тр}}}{\eta} = \frac{1340}{0.9} = 1490 \text{ Вт} \quad (2.15)$$

По требуемой добротности, мощности и максимальной скорости может быть подобран двигатель, но так как двигатель рассчитывается под требования для частного случая, это делаться не будет.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28



## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ РЕДУКТОРА

При известном значении эквивалентного момента инерции, может быть рассчитано оптимальное значение передаточного отношения редуктора  $q_{\text{опт}}$ .

Передаточное отношение редуктора – это отношение угловой скорости ведущего вала к угловой скорости ведомого вала.

Редуктор – это такое устройство, которое передаёт и преобразует крутящий момент, с одной или более механическими передачами [7]. В его состав входят такие передачи, как червячные или зубчатые, которые расположены в отдельном герметичном корпусе. Такое расположение сильно отличает его от зубчатой или червячной передачи, которая встраивается в исполнительный механизм или в какую-нибудь машину [8].

Образно говоря, редуктор преобразует угловую скорость вращения входного вала, понижая или повышая её на выходном валу, вращающий момент выходного вала тоже отличается от момента на входном валу, он обратно пропорционален изменению скорости.

Приведена формула передаточного отношения редуктора, обеспечивающего заданное ускорение при минимальном значении момента  $q_{\text{опт}}$  [1]:

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{нэ}}}{J_{\text{р}}}} \quad (2.16)$$

–  $J_{\text{р}}$  – момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>.

На основе формулы из статьи [6] выводится момент инерции ротора  $J_{\text{р}}$ :

$$J_{\text{р}} = \frac{\pi}{32} \cdot \gamma \cdot l \cdot D^4 = \frac{\pi}{32} \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot D^5 \quad (2.17)$$

- $D$ – наружный диаметр ротора, м;
- $l$ – осевая длина воздушного зазора, м.

Далее находится наружный диаметр ротора  $D$  [6]:

$$D = \frac{8 \cdot \gamma \cdot J_{\text{нэ}} \cdot \varphi^2}{\pi \cdot \lambda \cdot \alpha_{\delta}^2 \cdot k_{o\delta}^2 \cdot k_B^2 \cdot (B_{\delta} \cdot A)^2 \cdot t_0^4} \quad (2.18)$$

В соответствии со значениями параметров из таблицы 2.1 и 2.2, рассчитываются выражения:

$$D = \frac{8 \cdot 7800 \cdot 0.5 \cdot 0.16}{3.14 \cdot 2 \cdot 0.5 \cdot 0.9 \cdot 1.23 \cdot 256 \cdot 10^6 \cdot 0.1^4} = 0.06 \text{ м} \quad (2.19)$$

При известном значении наружного диаметра ротора, может быть посчитан момент инерции ротора  $J_p$  [6]:

$$J_p = 0.1 \cdot 7800 \cdot 2 \cdot 0.06^5 = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.20)$$

При известном значении момента инерции ротора, может быть рассчитано оптимальное значение передаточного отношения редуктора  $q_{\text{опт}}$ :

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{нэ}}}{J_p}} = \sqrt{\frac{0.5}{1.3 \cdot 10^{-3}}} = 20 \quad (2.21)$$

Стоит уточнить, что значение оптимального отношения редуктора берётся приближённо, так как кинематика от двигателя к соплу не рассматривается.

### 2.3. УСТРОЙСТВО РЕДУКТОРА В РАЗРАБАТЫВАЕМОМ ПРИВОДЕ

Изменяться положение Рабочего Органа будет с помощью шарико-винтовой передачи, преобразуя вращательное движение исполнительного двигателя в линейное движение сопла.

Шарико-винтовая передача (ШВП) рисунок 2.1 - линейный механический привод, с помощью которого вращательное движение преобразуется в линейное перемещение. ШВП выглядит как винт большой длины, на который навинчена гайка особой конструкции. В её внутреннем пространстве, между резьбами гайки и винта по спиралевидной траектории движутся шарики, попадающие во внешние и внутренние возвратные каналы.

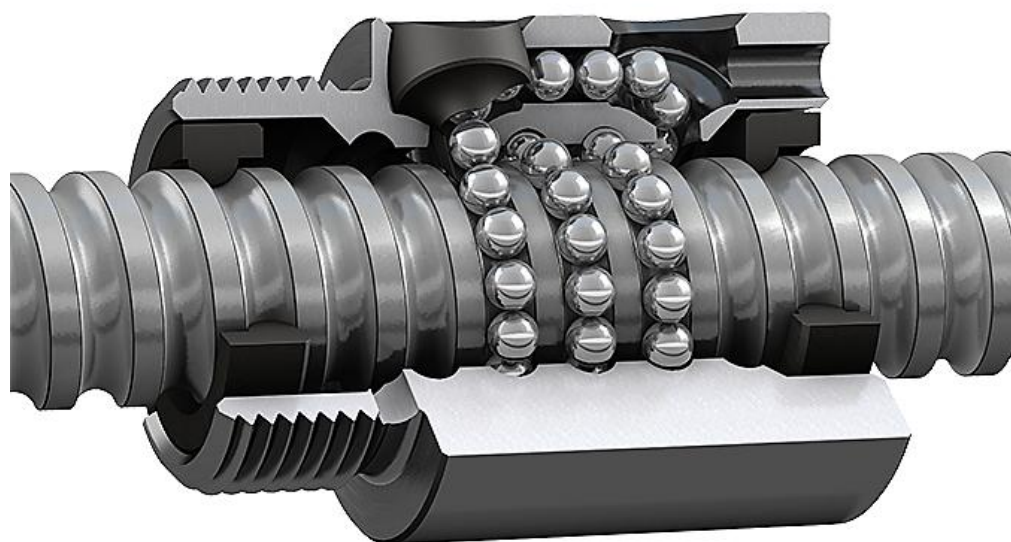


Рис. 2.1 - Шарико-винтовая передача

Главное отличие от стандартной пары гайка-винт в шариково-винтовой передаче состоит в преобразовании одного вида движения в другой с помощью шариков, которые передают механическую энергию от винта к гайке (либо же наоборот) с гораздо меньшими потерями. Благодаря этому обеспечивается целый ряд преимуществ ШВП:

- а) коэффициент полезного действия минимум 80%,
- б) обеспечение требуемых динамических характеристик при меньшей мощности и крутящем моменте приводных сервомоторов,
- в) низкая интенсивность износа,
- г) длительный срок службы, что определяется меньшей усталостью металла при воздействии трения качения в сравнении с трением скольжения в обычных винтовых парах,
- д) возможность непрерывного функционирования из-за отсутствия высоких температур.

Стоит заметить, что низкий коэффициент трения в ШВП является не только преимуществом, из-за отсутствия сопротивления, особенно при большом шаге резьбы на винте, может возникнуть эффект самопроизвольного движения гайки (скатывания) с прикреплённым к ней полезным грузом. Этот эффект проявляется тем ярче, чем выше масса полезной нагрузки. Для предотвращения скатывания гайки приходится дооснащать привод специальным тормозным механизмом, что в целом усложняет конструкцию, но поправимо.

### 3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### 3.1 Устройство и принцип действия Вентильного Двигателя

Так как фактором, ограничивающим применение двигателя постоянного тока ДПТ классического исполнения, является наличие коллекторного узла. Было решено использовать в разработке вентильный двигатель, так как у него отсутствует скользящий контакт, и он является одним из самых перспективных исполнительных элементов современного электропривода [9].

В качестве исполнительного органа для разрабатываемого электропривода был выбран вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. При выборе учитывались современные тенденции, положительный опыт при проектировании ракет и их запуске [3].

Вентильный двигатель рисунок 3.1 – это разновидность электродвигателя постоянного тока, в котором коммутация секций (фаз) обмотки статора осуществляется с помощью полупроводникового коммутатора, управляемого сигналами, позволяющими выявить положение ротора по отношению к статору. Чаще всего эти сигналы вырабатывает датчик положения ротора (ДПР). ДПР осуществляет позиционную обратную связь в зависимости от положения магнитной оси ротора по отношению к эквивалентной магнитной оси статора. Эта позиционная обратная связь аналогична функции, выполняемой коллектором в машине постоянного тока [9].

Двигатель состоит из постоянного магнита-ротора, вращающегося в магнитном поле катушек статора, по которым проходит ток, коммутируемый ключами (вентильми), управляемыми микроконтроллером. Микроконтроллер переключает фазовые обмотки таким образом, чтобы взаимодействие их поля с полем ротора создавало крутящий момент при любом его положении [10].

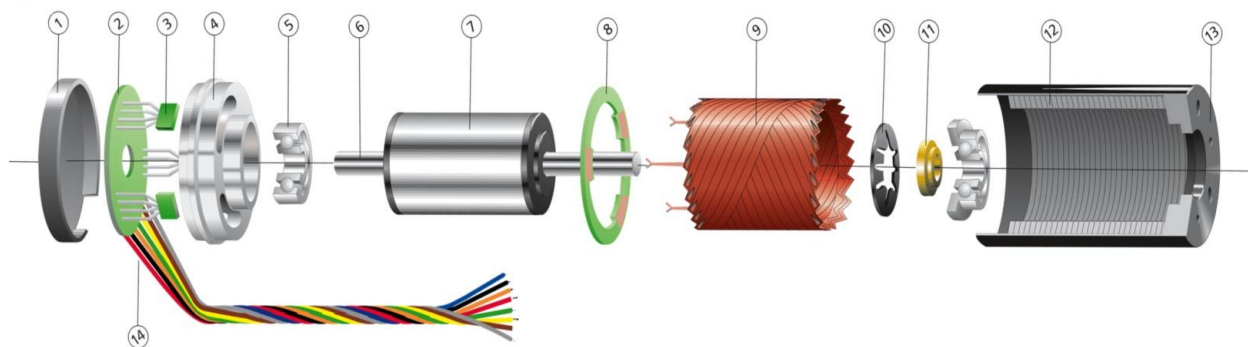


Рис. 3.1 - Образец вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов в разборе

1. Задняя крышка.
2. Монтажная плата.
3. Датчик с эффектом Холла.
4. Обойма.
5. Подшипник.
6. Роторный вал.
7. Постоянные магниты.
8. Изоляционное кольцо.
9. Обмотка статора.
10. Пружина.
11. Втулка.
12. Диэлектрическая прослойка.
13. Корпус электродвигателя.
14. Жгут электропроводки.

Важные элементы системы требуют более подробного описания.

Статор рисунок 3.2 - имеет традиционную конструкцию. Он состоит из корпуса, сердечника из электротехнической стали и медной распределённой обмотки, уложенной в пазы по периметру сердечника. Обмотка разбита на фазы, которые уложены в пазы таким образом, что пространственно сдвинуты друг относительно друга на угол, определяемый числом фаз. Известно, что для равномерного вращения вала двигателя машины переменного тока достаточно двух фаз. Обычно синхронные машины, применяемые в ВД, трёхфазные.

Ротор рисунок 3.2 – конструктивно будет стандартным, то есть располагаться внутри статора. Изготавливается с использованием постоянных магнитов и имеет обычно от двух до шестнадцати пар полюсов с чередованием северного и южного полюсов. Для изготовления ротора раньше использовались ферритовые магниты, что определялось их распространённостью и дешевизной, однако такие магниты характеризуются низким уровнем магнитной индукции. В настоящее время интенсивно используются магниты из сплавов редкоземельных элементов, поскольку они позволяют получить более высокий уровень магнитной индукции и уменьшить размер ротора.

Основные части ротора и статора на рисунке 3.2.

1. Распределенная обмотка.
2. Сердечник статора (из электротехнической стали).
3. Ступица ротора.
4. Магниты.
5. Секции сердечника ротора (из электротехнической стали).
6. Маска с рисками для работы оптического датчика.
7. Подшипник.

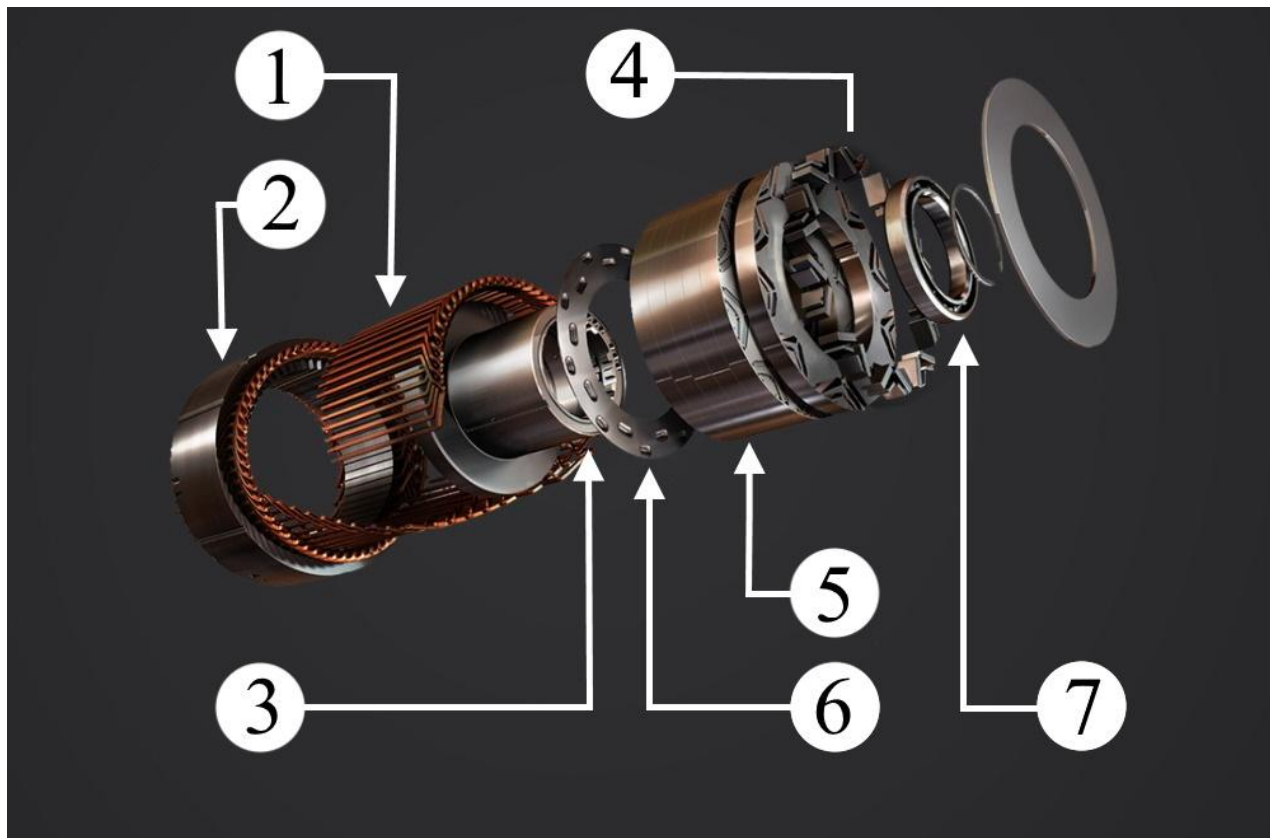


Рис. 3.2 - Статор и ротор вентильного двигателя в разборе

Датчик положения ротора (ДПР) – информационный узел, служащий для определения относительного положения магнитной оси ротора и эквивалентной оси статора и выдачи соответствующих команд для системы управления. При разработке привода выбор был сделан в пользу индуктивных угловых энкодеров, рисунок 3.3. Это бесконтактные устройства для точного измерения углов. Они работают по принципу трансформатора, используя электромагнитную индукцию.

Датчики идеально подходят для использования в неблагоприятной среде, когда потенциометры, оптические или ёмкостные устройства могут оказаться ненадежными.

Энкодер состоит из двух основных компонентов — статора и ротора, — которые выполнены в форме плоского кольца. В статор интегрирована необходимая электроника для обработки сигналов и передачи данных по стандартным интерфейсам.



Так как датчик абсолютный, на его выход поступает информация об абсолютном положении ротора относительно статора. Большой диаметр позволяет с легкостью надевать их на сквозные валы. Поэтому ротор может быть смонтирован непосредственно на валу, а статор – на неподвижной части двигателя или редуктора, что обеспечит прямое измерение угла или скорости без необходимости применения различных муфт или редукторов между основным валом и энкодером.

Требования к энкодеру:

1. Неограниченный угол поворота.
2. Дискретность не менее 1 минуты, с точностью плюс/минус 0.5 минуты.

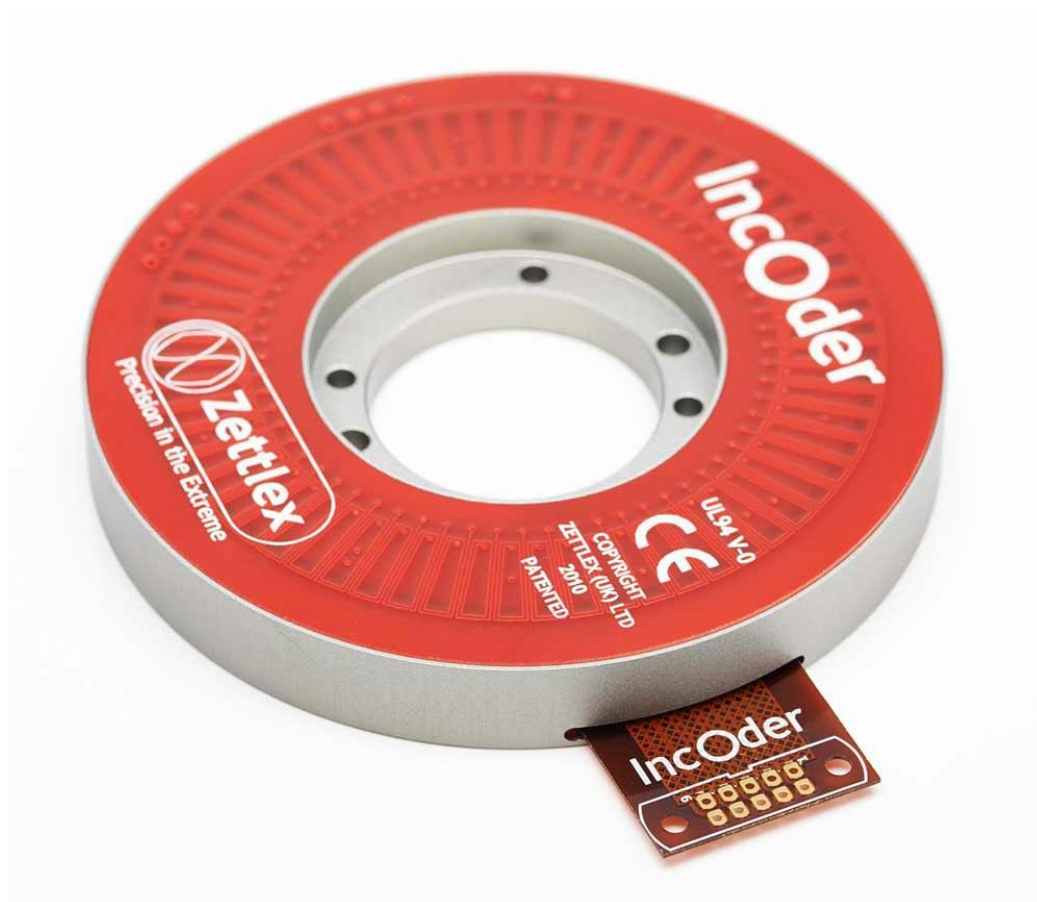


Рис. 3.3 - Модель энкодера, крепящаяся на вал двигателя.

### Датчик перемещения рабочего органа

Внешний контур содержит датчик положения объекта относительно базовой системы координат. В данном случае это будет потенциметрический датчик линейного перемещения, рисунок 3.4, расположенный на валу шарико-винтовой передачи. Сигнал с выхода датчика угла сравнивается с управляющим сигналом  $U_0$ , определяющим положение объекта. По результату сравнения регулятор положения – вырабатывает сигнал  $U_{pn}$  регулирования скорости, который, в конечном счете, обеспечивает вращение двигателя и перемещение рабочего органа – на заданный угол.



Рис. 3.4 – Потенциметрический датчик линейного перемещения

Система управления – переключающее устройство, состоящее из полупроводниковых ключей, предназначенное для согласованной коммутации фаз вентильного двигателя по сигналам ДПР. Главным элементом является микроконтроллер, который регулирует работу силового инвертора. Микроконтроллер создан не только для контроля силовых инверторов, но и для того, чтобы обрабатывать получаемый сигнал с датчиков и преобразовывать синусоидальную коммутацию в удобную форму сигнала. Когда информация приходит на микроконтроллер, он формирует широтно-импульсный сигнал, который инвертором усиливается и преобразуется в трехфазный, а потом

подаётся на обмотки статора. В данной разработке коммутатор будет построен на полностью управляемых элементах – транзисторах [9].

Отметим преимущества вентильных двигателей постоянного тока:

- а) высокие энергетические показатели, КПД выше 90%,
- б) возможность эксплуатации в агрессивной и взрывоопасной среде,
- в) отсутствие скользящих электрических контактов,
- г) отсутствие потерь на возбуждение,
- д) эффективное охлаждение,
- е) благодаря применению современных магнитотвёрдых материалов по такому важному удельному показателю, как добротность, ему практически нет равных среди разнообразных типов электрических двигателей,
- ж) создаются на мощности от долей Ватт до нескольких сотен килоВатт и имеют широкий диапазон изменения частоты вращения.

Среди недостатков выделяют:

- а) обязательное присутствие специального управляющего блока,
- б) высокая стоимость двигателя, обусловленная частым использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора.

Вентильный двигатель действительно удовлетворяет всем представленным к исполнительному органу требованиям. ВД может работать в агрессивной среде, имея небольшие массогабаритные характеристики, он обладает высокими удельными показателями, а дороговизна и сложность эксплуатации перекрывается спецификой применения, исходя из этого ясно, почему в современном ракетостроении часто используется именно такой тип двигателя.

### 3.2. ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Регулировать работу вентиляционного двигателя будет векторное управление. Движение в двигателе происходит за счёт следования магнитной оси ротора за вращающимся полем статора, по принципу движения намагниченной стрелки компаса за мощным магнитным полем. Так как на борту космического аппарата используется ток постоянного напряжения, чтобы могло быть создано вращающееся магнитное поле, с помощью силового инвертора под управлением микроконтроллера будет регулироваться ток в фазных обмотках статора. Наибольший интерес представляет магнитный поток от статора в том месте, где расположен ротор, т.е. в центре двигателя (краевыми эффектами, рассеянием и всем прочим пренебрегаем). Магнитные потоки трёх перпендикулярно расположенных катушек векторно складываются, образуя для взаимодействия с ротором один общий поток. Но так как поток пропорционален току в катушке, удобно, чтобы были нарисованы вектора токов, сонаправленные с потоком. При сложении векторов фазных токов, получается управляющий вектор рисунок 3.5.

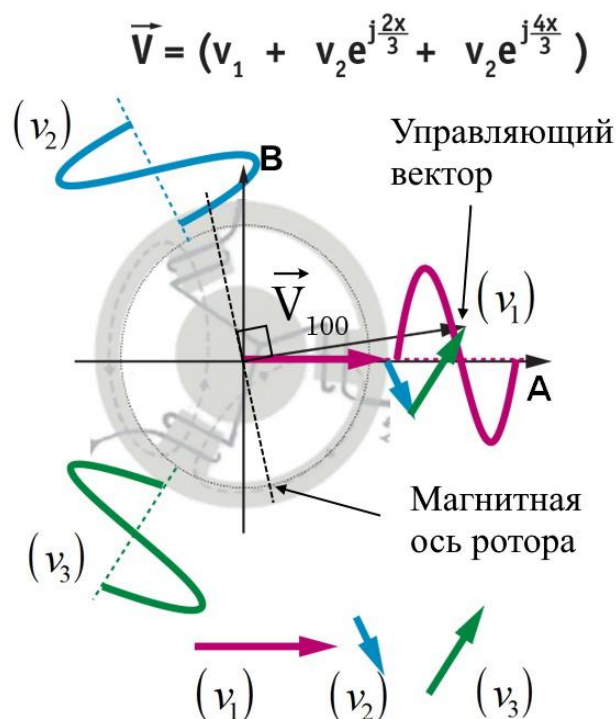


Рис. 3.5 - Наглядное векторное управление

Известно, что наибольшим моментом ротор обладает, если его магнитная ось расположена под  $90^\circ$  к управляющему вектору тока. Так как при создании системы управления на микроконтроллере требуется получить от двигателя наибольший момент при минимуме потерь, а потери, в первую очередь, это ток в обмотках, то рациональнее всего, чтобы вектор тока был всегда поставлен под  $90^\circ$  к магнитному полю ротора. Конечно же, чтобы знать как «расположить» управляющий вектор относительно ротора, требуется знать положение ротора, для этого и требуется ДПР. Регулировать же момент двигателя будет амплитуда тока. Чем больше амплитуда – тем выше момент. Скорость вращения зависит от частоты тока в обмотках статора, что может регулироваться на столько, насколько позволит быстроедействие инвертора. Именно это и называется векторным управлением – когда управляющий вектор тока статора управляется так, чтобы он был под  $90^\circ$  к магнитному полю ротора.

Преимущества векторного управления с ДПР [11]:

- а) плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя,
- б) плавный старт и плавное вращение двигателя во всем диапазоне частот,
- в) быстрая реакция на изменение нагрузки: при изменении нагрузки практически не происходит изменения скорости,
- г) увеличенный диапазон управления и точность регулирования,
- д) снижаются потери на нагрев и намагничивание, повышается КПД электродвигателя.

Недостатком является требование датчика положения ротора и мощного микроконтроллера системы управления.

Данная глава уделялась для демонстрации понимания физики процессов, более подробное описание векторного управления в задачи не входило.

### 3.3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Уточняется, что в данной работе не делается полное проектирование двигателя, а приближённо определяются параметры, которые необходимы для синтеза системы управления приводом. В последующем эти параметры будут использоваться как основа для составления технического задания на проектирование двигателя, под рассчитанные характеристики.

После подробного разбора устройства и принципа работы вентильного двигателя, далее следует расчёт его параметров. При подстановке наружного диаметра ротора  $D = 0.6$  м, который получен в выражении 2.18, рассчитываются остальные габариты электродвигателя: длина ротора:  $l_p$ , длина двигателя  $l_0$ , наружный диаметр двигателя  $D_0$  по известным пропорциям [6]:

$$l_p = D \cdot 2 = 0.6 \cdot 2 = 0.12 \text{ м} \quad (3.1)$$

$$l_0 = l_p \cdot 1.65 = 0.12 \cdot 1.65 = 0.2 \text{ м} \quad (3.2)$$

$$D_0 = D \cdot 1.4 = 0.6 \cdot 1.4 = 0.085 \text{ м} \quad (3.3)$$

Масса приближенно определяется по относительным показателям  $\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ . Для систем такого класса она равняется  $\frac{1 \text{ кВт}}{2 \text{ кг}}$ , при подстановке полученной  $P_{\text{тр}} = 1340$  Вт из выражения 2.14, находится масса исполнительного двигателя:

$$m = \frac{P_{\text{тр}}}{2} = \frac{1.34}{2} = 0.67 \text{ кг} \quad (3.4)$$

Следуя методике расчёта, на основе полученных данных находится максимальное значение скорости ротора, в процессе отработки задания  $\omega_{max}$  [6].

$$\omega_{max} = \frac{2 \cdot q_{opt} \cdot \varphi}{t_0} \quad (3.5)$$

При подстановке известных величин  $q_{opt}$ ,  $\varphi$ ,  $t_0$  рассчитывается:

$$\omega_{max} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 04}{0.1} = 161.11 \text{ рад/с} \quad (3.6)$$

Через отношение к максимальной скорости рассчитывается скорость ротора в режиме холостого хода  $\omega_{xx}$  (без нагрузки):

$$\omega_{xx} = 1.2 \cdot \omega_{max} = 1.2 \cdot 161.11 = 193.3 \text{ рад/с} \quad (3.7)$$

Далее производится расчёт электрических параметров якоря, начиная с коэффициента магнитного потока  $k \cdot \Phi$ , который показывает зависимость между магнитным потоком статора, который в свою очередь пропорционален ЭДС, и скорости вращения ротора [4].

$$k \cdot \Phi = \frac{E_{я}}{\omega_{max}} \quad (3.8)$$

где  $E_{я}$ - установившаяся ЭДС якоря, которое рассчитывается по формуле:

$$E_{я} = U_{пит} - I_{я} \cdot R_{я} \quad (3.9)$$

- $U_{пит}$ – данные взятые из таблицы 2.1;
- $I_{я}$ – установившееся значение тока якоря, А;
- $R_{я}$ – сопротивление обмоток якоря, Ом.

Требуется расчёт неизвестных величин:

$$I_{\text{я}} = \frac{P_{\text{тр}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{1340}{28} = 48 \text{ А} \quad (3.10)$$

При известном значении тока якоря, находится сопротивление якоря. Рассчитанные ранее (в выражениях 2.14 и 2.15) мощности – ключ к сопротивлению обмотки якоря. При известных значениях потребляемой и полезной (требуемой) мощностей, считается мощность, которая уходит на активные (тепловые) потери, а уже через неё находится и сопротивление проводников:

$$R_{\text{я}} = \frac{P_{\text{акт}}}{I_{\text{я}}^2} \quad (3.11)$$

–  $P_{\text{акт}}$  – активная мощность, Вт.

$$P_{\text{акт}} = P_{\text{потр}} - P_{\text{тр}} = 1490 - 1340 = 150 \text{ Вт} \quad (3.12)$$

Рассчитывается сопротивление  $R_{\text{я}}$ :

$$R_{\text{я}} = \frac{P_{\text{акт}}}{I_{\text{я}}^2} = \frac{150}{48^2} = 0.07 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

При расчёте скорости вращения ротора находится установившееся ЭДС якоря:

$$E_{\text{я}} = U_{\text{пит}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 28 - 48 \cdot 0.07 = 24.6 \text{ В} \quad (3.14)$$

Наконец производится расчёт  $k \cdot \phi$ :

$$k \cdot \phi = \frac{E_{\text{я}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{24.6}{161.1} = 0.15 \quad (3.15)$$



Одной из важных характеристик обмотки якоря является её индуктивность, при известном значении сопротивления медной обмотки, рассчитывается её значение:

$$L_{я} = R_{я} \cdot T_{я} \quad (3.16)$$

–  $T_{я}$  – постоянная времени, её значение принимается из практики расчета электрических машин подобного класса, равной  $1 \cdot 10^{-4}$  секунды [12].

$$L_{я} = 0.07 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 7 \cdot 10^{-6} = 7 \text{ мкГн} \quad (3.17)$$

Рассчитывается максимальный момент  $M_{max}$ , он же электромагнитный, который будет развивать наш двигатель, но имеется в виду, что это полезный момент на валу двигателя без учёта статической нагрузки, прикладываемой всей системой привода, к ротору:

$$M_{max} = k \cdot \Phi \cdot I_{я} = 0.15 \cdot 48 = 7.7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.18)$$

Находится пусковой момент, развиваемый электрической машиной, на нём никак не отразится дальнейшее уточнение взятых предварительно характеристик:

$$M_{пуск} = \frac{U_{пит}}{R_{я}} k \cdot \Phi = \frac{28}{0.07} \cdot 0.15 = 60 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.19)$$

На этом этапе может быть пересчитана взятая приближённо переменная  $\mu_{зад}$ , равная отношению момента статической нагрузки  $M_{сн}$  к моменту двигателя  $M_{max}$ .

Выводится и считается переменная  $\mu$  [6]:

$$\mu = \frac{M_{сн}}{M_{max}} \quad (3.20)$$

Для дальнейшего расчёта требуется значение момента статической нагрузки  $M_{сн}$ , который показывает, какой момент, будет приложен к ротору двигателя от рабочего органа и оставшихся частей системы через редуктор:

$$M_{сн} = \frac{M_c}{q_{опт} \cdot \eta} = \frac{34.8}{20 \cdot 0.9} = 1.9 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.21)$$

$$\mu = \frac{M_{сн}}{M_{max}} = \frac{1.9}{7.7} = 0.25 \quad (3.22)$$

Приводится выражение момента  $M$ , которое, в меру точности методики, наиболее полно показывает, на что тратится механическая энергия двигателя:

$$M = \frac{4 \cdot J_p \cdot q_{опт} \cdot \varphi}{t_0^2} + \frac{4 \cdot J_{нэ} \cdot \varphi}{t_0^2 \cdot q_{опт}} + \frac{M_c \cdot \mu}{q_{опт} \cdot \eta} \quad (3.23)$$

При подстановке рассчитанных ранее параметров, получено:

$$M = \frac{4 \cdot 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 0.4}{0.1^2} + \frac{4 \cdot 0.5 \cdot 0.4}{0.1^2 \cdot 20} + \frac{34.8 \cdot 0.1}{20 \cdot 0.9} = 8.6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.24)$$

Первая составляющая в правой части показывает, какая часть момента обеспечивает разворот на заданный угол ротора самого двигателя, вторая составляющая – разворот на заданный угол рабочего органа и третья – преодоление момента рабочего органа.

Далее находится добротность рассчитанной машины фактическая, проверяется, будет ли выполняться неравенство добротностей  $D_{факт} > 1.2D_{тр}$ .

$$D_{факт} = \frac{M}{\sqrt{J_p}} = \frac{8.6}{\sqrt{1.3 \cdot 10^{-3}}} = 240 \frac{\text{Н}}{\sqrt{\text{кг}}} \quad (3.25)$$

Сравнивая с  $D_{тр} = 231.6 \frac{\text{Н}}{\sqrt{\text{кг}}}$  из выражения 2.12, видно, что неравенство не выполняется, значит, вводится режим форсирования и через коэффициент форсирования  $k_{форс}$  повышается фактическая добротность до требуемой

величины, так как это приближённый расчёт, вводится коэффициент форсирования при оптимизации [13]. Тем не менее, расчёт показывает, что даже и приближённо, но посчитанные величины находятся близко к требуемым параметрам двигателя, но пока что без запаса.

Для удобства и подведения итогов, рассчитанные величины объединяются в таблицу приближённых параметров исполнительного двигателя.

Таблица 3.1. Приближённые расчётные параметры исполнительного двигателя

Наименование	Обозначение	Значение
момент инерции ротора	$J_p$	$1.3 \cdot 10^{-3}$ кг·м <sup>2</sup>
максимальная скорость вращения ротора при отработке задания	$\omega_{\max}$	161.11 рад/с
скорость ротора в режиме холостого хода (без нагрузки)	$\omega_{\text{хх}}$	193.3 рад/с
конструкторский коэффициент	кФ	0.15 Вб
требуемая мощность	$P_{\text{тр}}$	1340 Вт
сопротивление обмотки якоря (статора)	$R_{\text{я}}$	0.07 Ом
ток якоря	$I_{\text{я}}$	48 А
индуктивность обмотки якоря	$L_{\text{я}}$	$7 \cdot 10^{-6}$ Гн
постоянная времени	$T_{\text{я}}$	$10^{-4}$ с
момент максимальный	$M_{\max}$	7.7 Н·м
пусковой момент	$M_{\text{пуск}}$	60 Н·м
динамическая добротность двигателя	$D_{\text{факт}}$	$240 \frac{\text{Н}}{\sqrt{\text{кг}}}$

Для удобства и подведения итогов, рассчитанные величины объединяются в таблицу массогабаритных параметров исполнительного двигателя.

Таблица 3.2. - Приближённые расчётные параметры исполнительного двигателя

Наименование	Обозначение	Значение
диаметр ротора	$D$	0.06 м
длина ротора	$l_p$	0.12 м
длина двигателя	$l_0$	0.2 м
наружный диаметр двигателя	$D_0$	0.085 м
приближённая масса исполнительного двигателя	$m$	0.67 кг

### 3.4. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИГАТЕЛЯ

Для представления связи механических координат (скорости и момента) в аналитической или графической форме вводится понятие механической характеристики, которая существует как для рабочего органа, так и для двигателя и представляет собой зависимость между моментом и скоростью. Формально она подставляется в виде зависимости  $M=f(\omega)$  для двигателя и  $M_c=f(\omega)$  для рабочего органа. Механические характеристики могут быть представлены и обратными зависимостями. Причем, для рабочего органа чаще всего независимой переменной является скорость, поэтому здесь целесообразно представлять характеристику в виде зависимости момента от скорости, а для двигателя лучше использовать обратные зависимости  $\omega=f(M)$ , так как здесь чаще независимой переменной является момент. Хотя в зависимости от решаемых задач используется и та и другая форма записи [14].

Расчёты моментов  $M_{max}$  и  $M_{пуск}$ , необходимых для построения характеристики, были рассчитаны в выражениях 3.18 и 3.19 соответственно. На характеристике, рисунок 3.6, видно, что рабочая точка находится в рамках рабочей зоны, всё в порядке.

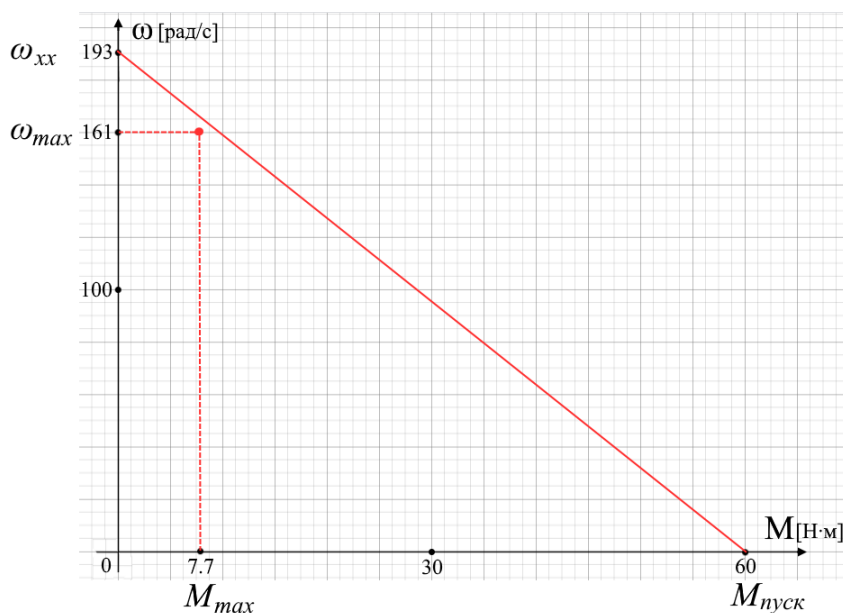


Рис. 3.6 - Механическая характеристика

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИВОДА

При расчёте параметров привода использовалась приближённая методика расчёта, которая требует уточнение через моделирование математической модели, рисунок 4.1, электрической машины [1].

В данной модели моделируются трения и потери моментов. Были использованы значения момента инерции рабочего органа, коэффициент передачи редуктора, КПД (равный 90%) и т.п. На основе данных из расчёта, была настроена модель.

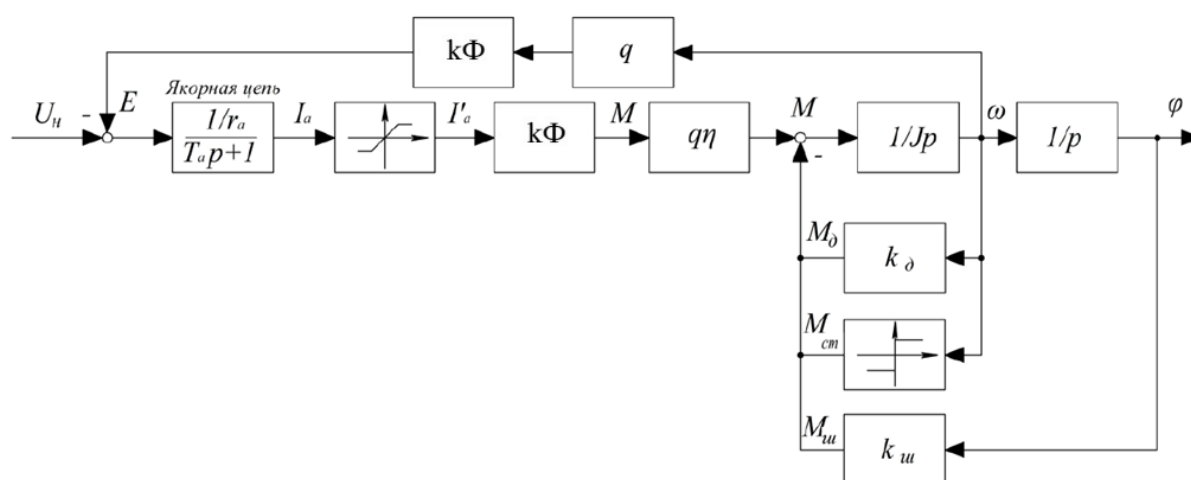


Рис. 4.1 – Математическая модель привода

Привод моделировался в программе VisSim, на основе данных из таблиц 3.1 и 3.2. Ниже поясняется, с помощью, каких блоков программы была реализована модель.

##### Блок управления.

В большинстве приводов наилучшим считается такой переходный процесс отработки средних перемещений, когда скорость двигателя в процессе отработки заданного угла изменяется по треугольному графику, т.е. при старт-стопном управлении. Это позволяет в полной мере использовать перегрузочную способность двигателя и исключает возникновение перерегулирования в переходном процессе.

После уточнения переменной  $\mu$  произведён расчёт временных отрезков разгона и торможения при старт-стопном управлении,  $t_1$  - время разгона,  $t_2$  - время торможения, рисунок 4.2 [1].

$$t_1 = \frac{1+\mu}{2} \cdot t_0 = \frac{1+0.25}{2} \cdot 0.1 = 0.062 \text{ с} \quad (4.1)$$

$$t_2 = \frac{1-\mu}{2} \cdot t_0 = \frac{1-0.25}{2} \cdot 0.1 = 0.038 \text{ с} \quad (4.2)$$

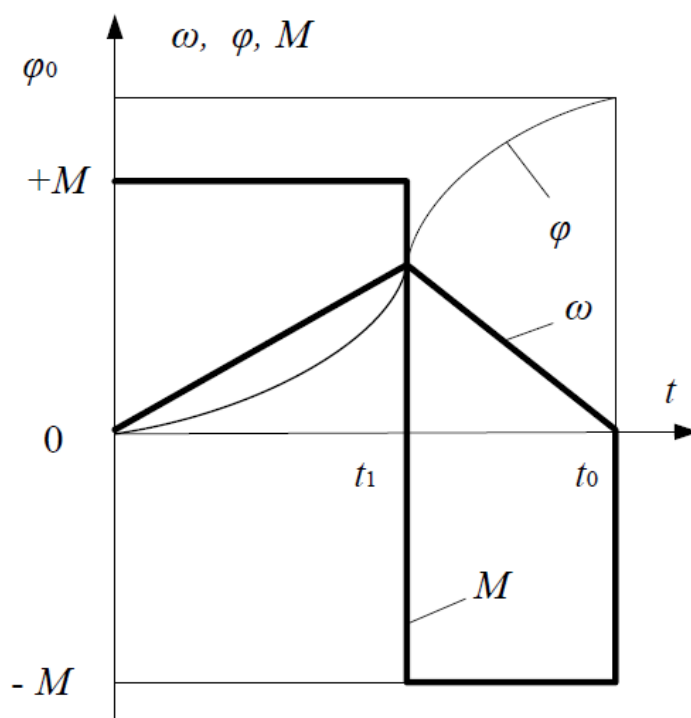


Рис. 4.2 – Диаграмма отработки угла при старт-стопном управлении

Данная временная диаграмма показывает, как релейное старт-стопное управление реализует максимальное быстродействие при отработке угла, где:

- $\omega$  – частота вращения ротора, рад/с;
- $\varphi$  – угол поворота рабочего органа, рад;
- $M$  – момент на валу рабочего органа, Нм.

Задаются временные отрезки разгона и торможения в блоках STEP так, чтобы сумма этих отрезков соответствовала длительности  $t_0 = 0.1$  с. и рассчитанным значениям  $t_1$  и  $t_2$ , но сумма в приоритете, так как имеет место уточнение расчётов рисунок 4.4.

Первый развёрнутый STEP-блок соответствует разгону, он включается сразу же, и на выходе появляется 1В, когда проходит задержка в 0.0625с (значение немного отличается, чтобы удовлетворять времени отработке задания) включается STEP-блок торможения и с двойной амплитудой изменяет знак напряжения, выдавая на выходе -1В.

Увеличивать сигнал задания до напряжения питания в модели будет преобразователь напряжения со своим передаточным коэффициентом, который рассчитан ниже. В сумме группа блоков образует блок питания рисунок 4.3.

$$k_{\text{пн}} = \frac{U_{\text{пит}}}{U_{\text{зад}}} = \frac{28}{1} = 28 \quad (4.3)$$

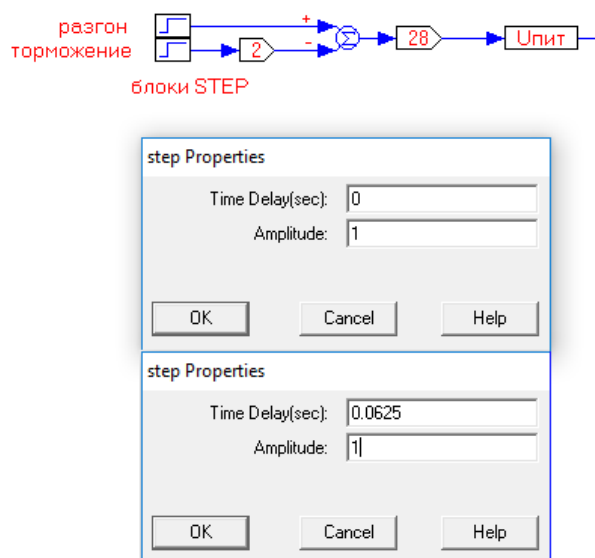


Рис. 4.3 Блок питания.



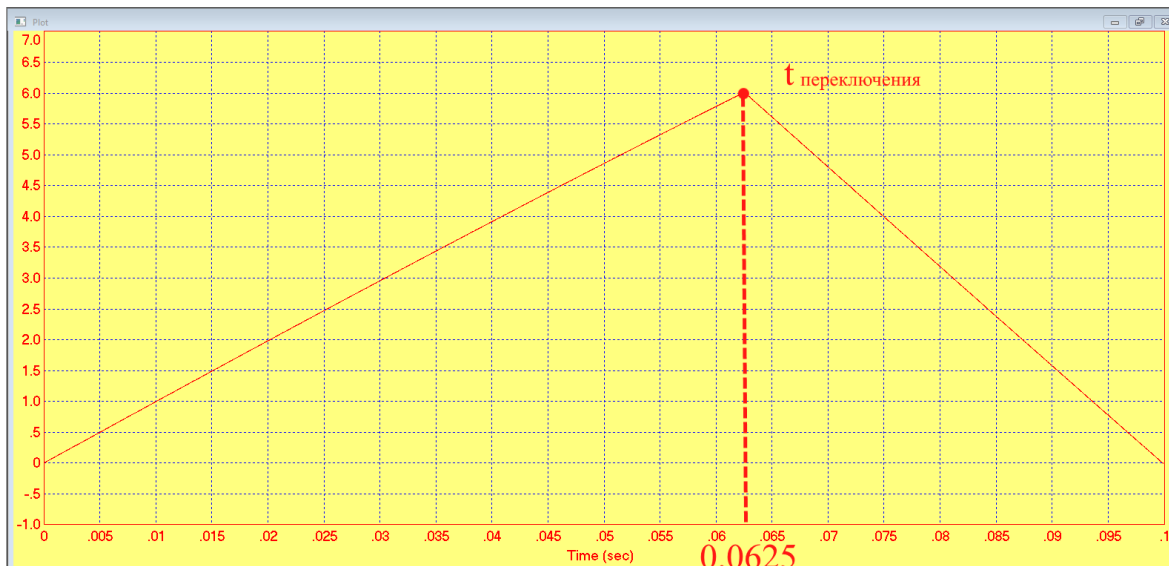


Рис. 4.4 Моделируемые отрезки разгона и торможения двигателя.

Ниже разобрана следующая группа блоков - блоки якорной цепи, якорная обмотка реализуется с помощью данного выражения рисунок 4.5 [1]:

$$\frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}p+1} = \frac{1/0.07}{0.0001+1} = \frac{14.3}{0.0001+1} \quad (4.4)$$

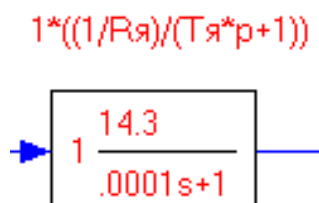


Рис. 4.5 блок обмотки якоря.

Далее идёт ограничение по максимальному току якоря рисунок 4.6, которое равно  $I_{\text{я}} = 48\text{A}$ , оно моделируется блоком LIMIT, который после умножения на  $k \cdot \phi$  даёт максимальный момент исполнительного двигателя  $M_{\text{max}}$ . Обратная связь по скорости вала двигателя  $\omega_{\text{дв}}$  реализована через блоки  $q_{\text{опт}}$  и  $k \cdot \phi$ .

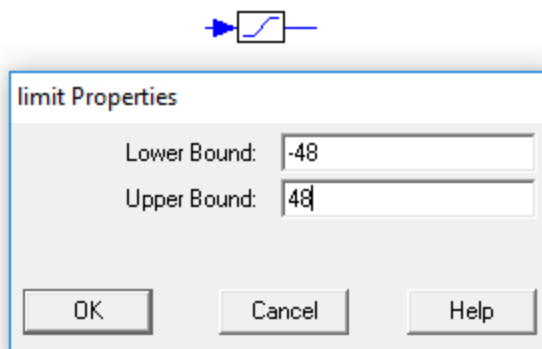


Рис. 4.6 Блок тока якоря.

Потом редуктор, который моделируется блоками GAIN со значениями  $q_{\text{опт}}$ ,  $\eta$ , и в сумме с предыдущими блоками образует модель рисунок 4.7, на выходе которой получается момент, приложенный к рабочему органу, но без поправок по моменту сопротивления  $M_c$ :

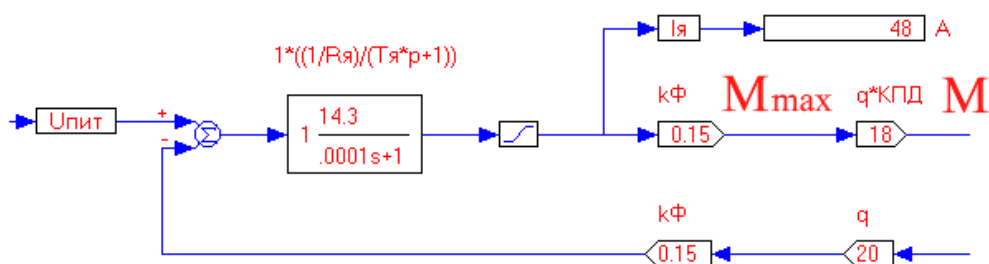


Рис. 4.7 Модель исполнительного двигателя и редуктора

Блок момента сопротивления  $M_c$  реализуется в виде суммы трёх моментов:  $M_{ш}$ ,  $M_{дм}$ ,  $M_{ст}$ , которая потом подаётся на блок рабочего органа. Сопло двигателя моделируется через приведённый к нему момент инерции, так как это самая важная характеристика для изменения его положения. Приведённый момент инерции рассчитывается через выражение [1]:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{po}} + J_p \cdot q^2 = 0.5 + 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.5)$$

Блок рабочего органа же реализован через функцию [4]:

$$W(p_0) = 1 \cdot \frac{1}{J_{пр}} \quad (4.6)$$

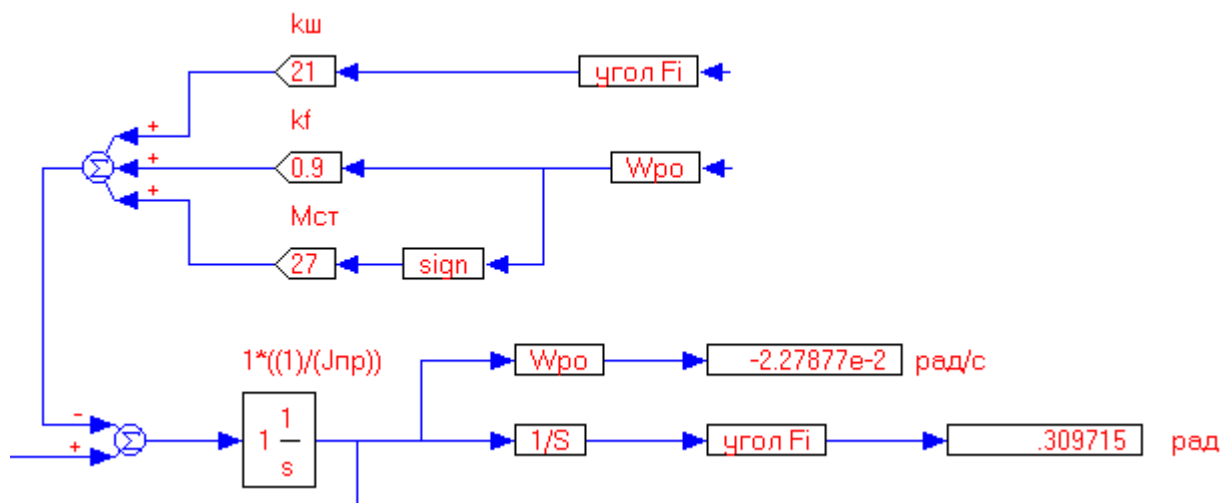


Рис. 4.8 Модель рабочего органа и действующего на него момента сопротивления

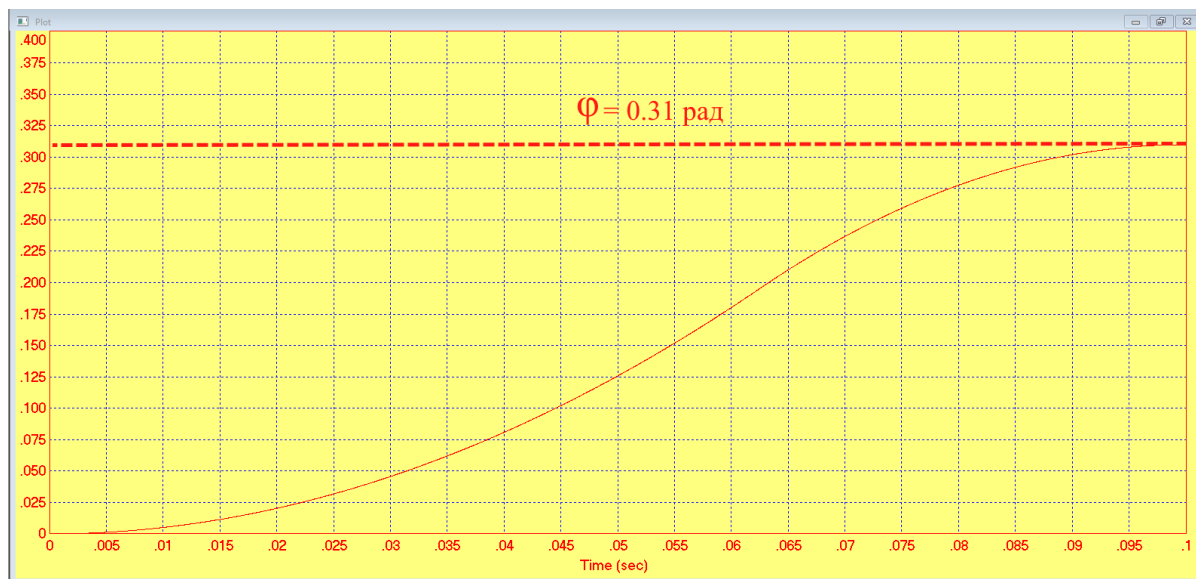


Рис. 4.9 График поворота рабочего органа при  $t_0 = 0.1$  секунды



## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА

Так как рассчитанная модель обрабатывает угол задания равным 0.31 радианы вместо 0.4 радианы, вводится этап оптимизации параметров электропривода.

Учитывая, что динамические режимы рассматриваемого вида, как правило, кратковременные, допустима перегрузка двигателя. Коэффициент перегрузки зависит от типа двигателя и общей циклограммы работы привода. Однако при перегрузке, как это будет показано в последующем, уменьшается максимальное значение скорости.

В соответствии с утверждением в параграфе 3.3 о необходимости коэффициента форсирования  $k_{форс}$ , в данной главе производится его расчёт. Чтобы повысить мощность, а соответственно и добротность, косвенно, во избежание увеличения массы и габаритов решено влиять на цепь якоря, а именно увеличивать ток в обмотках якоря. Методом подбора тока якоря  $I_{я}$  и изменением соотношения  $t_1$  и  $t_2$  ток был увеличен, чтобы исполнительный двигатель мог развивать больший момент. После оптимизации были получены следующие параметры, соответствующие оптимальному выполнению задания:

$$k_{форс} = \frac{I_{я \text{ факт}}}{I_{я \text{ расч}}} = \frac{61}{48} = 1.27 \quad (5.1)$$

Таким образом неравенство добротностей  $D_{факт} > 1.2D_{тр}$ , выполняется через  $k_{форс} = 1.27$ , и исполнительный двигатель будет удовлетворять всем требованиям рисунки 5.1 и 5.2.

Для удобства и подведения итогов, рассчитанные величины объединяются в таблицу параметров электропривода после оптимизации.

Таблица 5.1. Параметры электропривода после оптимизации

Наименование	Обозначение	Значение
ток якоря	$I_{я}$	61 А
время разгона	$t_1$	0.0605 с
время торможения	$t_2$	0.0395 с
отрабатываемый угол	$\varphi$	0.4 рад
коэффициент форсирования	$k_{форс}$	1.27

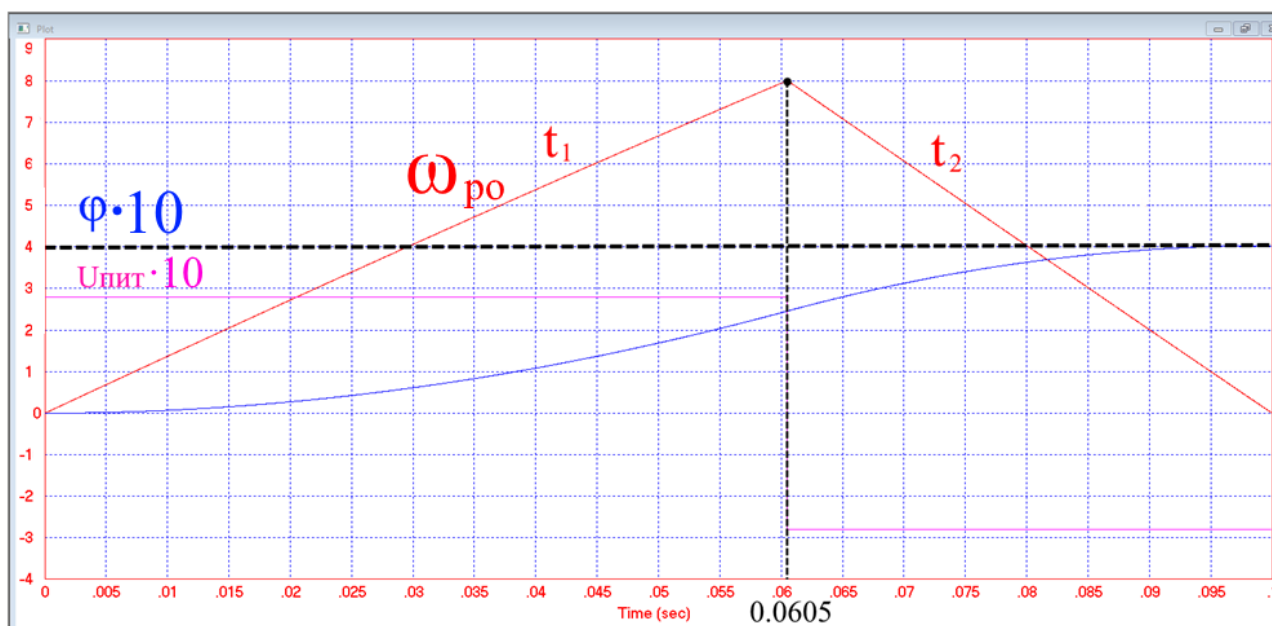


Рис. 5.1 Диаграмма работы привода при старт-стопном управлении



## 5.1. НАСТРОЙКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

Регулирование и стабилизация скорости вращения является одной из наиболее часто встречающихся задач автоматизированного привода. Наиболее характерным для систем регулирования скорости (СРС) является длительный режим работы. Хорошие динамические свойства способствуют повышению динамической точности СРС, а снижение диапазона упрощает решение вопросов повышения других качественных показателей.

Добавочные блоки контура регулирования скорости (КРС) выделены красным для наглядности. Скорость рабочего органа  $\omega_{po}$  обратно через редуктор преобразуется в скорость двигателя  $\omega_{дв}$  и проходит через коэффициент преобразователя скорости.

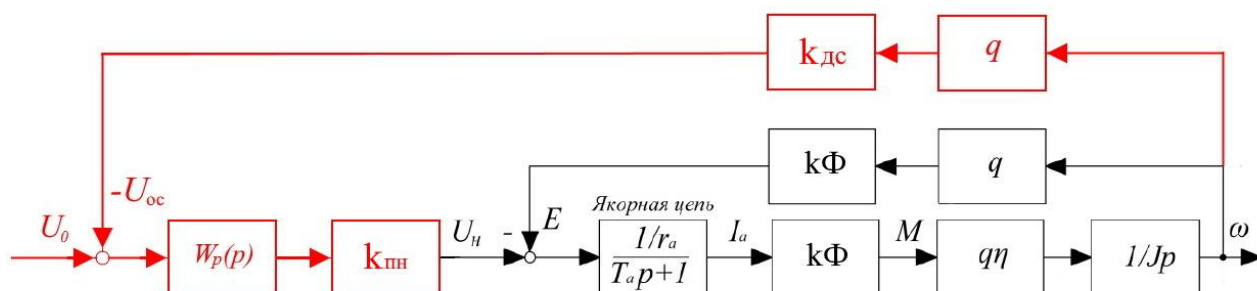


Рис. 5.3 – Математическая модель привода с блоками КРС

Далее на основе данных из таблицы 5.1 моделируется контур регулирования скорости в системе подчиненного типа, проводится настройка ПИ-регулятора на оптимум по модулю в режиме малых отклонений. В реальном объекте информация о скорости вала двигателя будет получена после обработки сигнала датчика положения ротора, рисунок 3.3, с помощью программного кода микроконтроллера.



Так как произошёл переход к управлению двигателем от микропроцессора, который в свою очередь управляет драйверами силового инвертора. Следовательно, сигнала задания  $U_{\text{зад}}$  будет приведён к диапазону ШИМ-сигнала, который равен плюс/минус 1 в относительных единицах.

Увеличивать сигнал задания до напряжения питания в модели будет преобразователь напряжения со своим передаточным коэффициентом, который рассчитан ниже. В сумме группа блоков образует блок питания рисунок 5.4.

$$k_{\text{пн}} = \frac{U_{\text{пит}}}{U_{\text{зад}}} = \frac{28}{1} = 28 \quad (5.2)$$

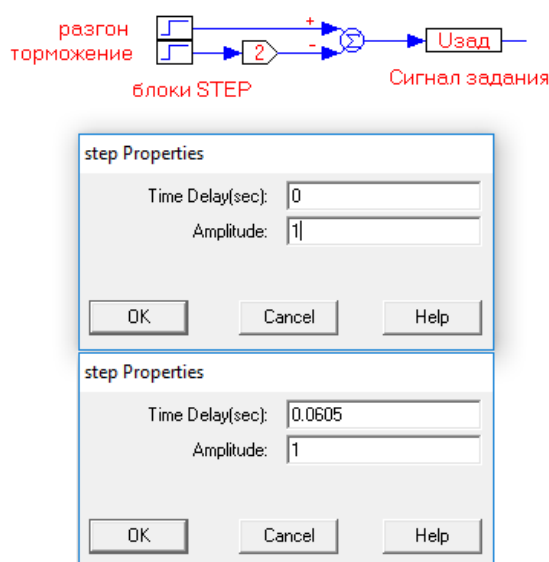


Рис. 5.4 – Блок напряжения задания

Далее рассчитывается передаточный коэффициент датчика скорости  $k_{\text{дс}}$  из расчёта, что с датчика положения ротора на аналого-цифровой преобразователь микропроцессора придёт опорное напряжение амплитудой, соответствующее полной шкале АЦП выбранного микроконтроллера  $STM32F303CBT6 = 3.3 \text{ В}$ , а полный диапазон изменения скорости ротора двигателя  $\omega_{\text{max}} = 160 \text{ рад/с}$ .

$$k_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{вх}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{3.3}{160} = 0.02 \text{ В/рад} \quad (5.3)$$

Расчёт контура регулирования скорости осуществляется простым способом, используя стандартные настройки. Тогда при ссылке на конспект лекций [4], передаточная функция регулятора скорости может быть записана в таком виде. Будет использоваться пропорционально-интегральный регулятор скорости с передаточной функцией.

$$W_{pc(p)} = k_{pc} \cdot \frac{T_M p + 1}{T_M p} \quad (5.4)$$

- $k_{pc}$  – передаточное значение пропорционального канала регулятора;
- $T_M$  – механическая постоянная времени, с.

Далее находятся неизвестные величины:

$$T_M = \frac{R_{я} \cdot J_{пр}}{k_{\Phi}^2} = \frac{0.07 \cdot 1}{0.15^2} = 3 \text{ с} \quad (5.5)$$

$$k_{pc} = \frac{T_M}{2 \cdot T_{я} \cdot k_{пн} \cdot \frac{1}{k_{\Phi}} \cdot k_{дс}} = \frac{3}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 28 \cdot \frac{1}{0.15} \cdot 0.02} = 4000 \quad (5.6)$$

Тогда получается передаточная функция регулятора скорости.

$$W_{pc(p)} = 4000 \cdot \frac{3p + 1}{3p} \quad (5.7)$$

Настроенный контур скорости, с учётом всех поправок, выглядит так:

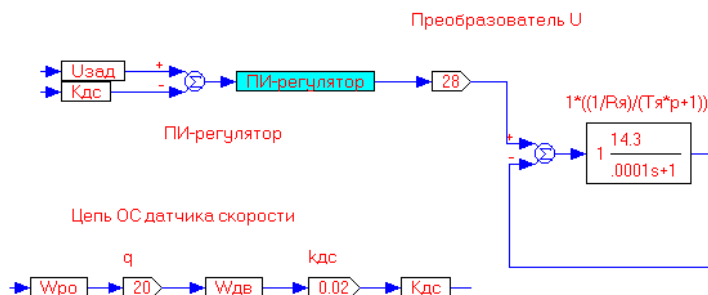


Рис. 5.5 – Смоделированная система регулирования скорости

Далее поясняется рисунок 5.5, первым идёт блок ПИ-регулятора. показывается цепь обратной связи датчика скорости, где видны соответствующие расчётным передаточный коэффициент редуктора  $q_{\text{опт}}$  и передаточный коэффициент датчика скорости  $k_{\text{дс}}$ .

Подаётся ступенчатое задание скорости двигателя на  $\omega = 0,01$  радианы, после моделирования получен переходный процесс - рисунок 5.6.

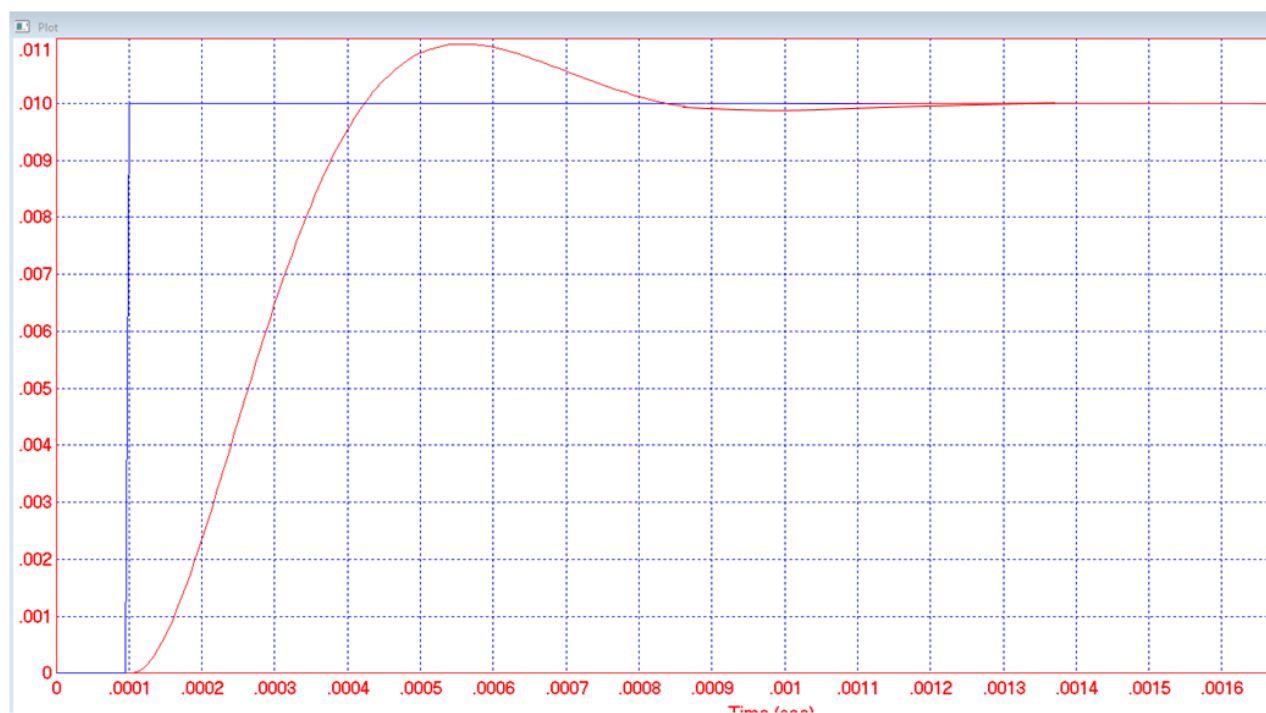


Рис. 5.6 – Переходный процесс обработки ступенчатого задания скорости

В соответствии с рисунком 5.6 видно перерегулирование  $\Delta\omega = 0,001$  секунды и длительность переходного процесса длительностью примерно в 8 раз больше постоянной времени  $T_{\text{я}} = 1 \cdot 10^{-4}$  с .

## 5.2. НАСТРОЙКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА

При добавлении и настройке контура регулирования положения рабочего органа моделируемый привод рассматривается как следящий. Следящие электроприводы или системы регулирующие положение (СРП) представляют собой замкнутые электроприводы, управляющие перемещением и обеспечивающие стабилизацию положения объекта регулирования относительно некоторой базовой системы координат. При этом регулируемая величина (положение объекта) с той или иной степенью точности должна соответствовать приложенному к системе управляющему воздействию. Следящий электропривод в данном случае обеспечивает угловое перемещение регулируемого объекта [4].

Во многих случаях следящие электроприводы строятся по принципу подчиненного регулирования на основе двигателей постоянного тока, коллекторных или вентильных. Поэтому основное внимание уделяется системе подчинённого типа [4]. Функциональная схема привода представлена на рисунке 5.7, где красным цветом обозначены блоки СРП:

- $K_{pn}$  – контур регулятора положения (КРП);
- $K_{\partial y}$  – датчик угла (ДУ).

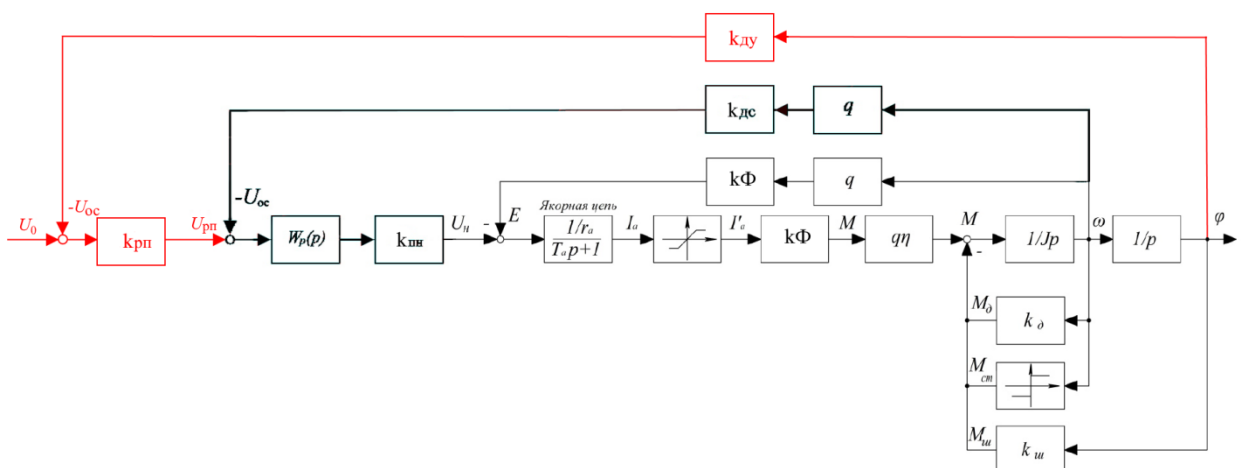


Рис. 5.7 – Математическая модель привода с блоками СРП

В соответствии с рисунком 5.7, электропривод содержит два контура регулирования: скорости и положения. Внутренние контуры регулирования (скорости и тока) строятся, как это было показано в главе 4 и параграфе 5.1. Внешний контур содержит датчик положения объекта относительно базовой системы координат. В данном случае это потенциометрический датчик линейного перемещения, расположенный на валу шарико-винтовой передачи. Сигнал с выхода датчика угла сравнивается с управляющим сигналом  $U_0$ , определяющим положение объекта. По результату сравнения регулятор положения – вырабатывает сигнал  $U_{pn}$  регулирования скорости, который, в конечном счете, обеспечивает вращение двигателя и перемещение рабочего органа – на заданный угол.

Далее рассчитан передаточный коэффициент датчика угла  $k_{ду}$  из расчёта, что с датчика положения ротора на аналого-цифровой преобразователь микропроцессора придёт опорное напряжение амплитудой, соответствующее полной шкале АЦП выбранного микроконтроллера  $STM32F303CBT6 = 3.3$  В, а полный диапазон изменения скорости ротора двигателя  $\omega_{po.max} = \pm 0.4 = 0.8$  рад.

$$k_{ду} = \frac{U_{вх}}{\omega_{max}} = \frac{3.3}{0.8} = 4 \text{ В/рад} \quad (5.8)$$

#### Блок напряжения задания.

В контуре регулирования положения напряжением задания является угол  $\varphi$ , на который должен рабочий орган повернуться. Значит, в блоке STEP будет генерироваться ступенчатое напряжение, соответствующее отклонению  $U_{зад} = 0.4$  рад. рисунок 5.8.

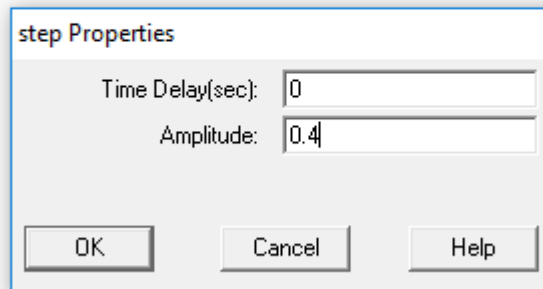
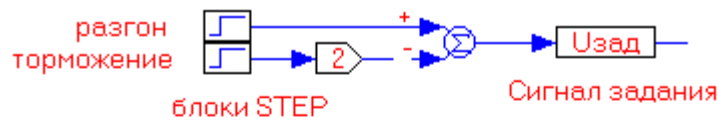


Рис. 5.8 – Математическая модель блока напряжения задания

В большинстве приводов наилучшим считается такой переходный процесс отработки средних перемещений, когда скорость двигателя в процессе отработки заданного угла изменяется по треугольному графику, т.е. при старт-стопном управлении, рассмотренном в главе 4. Для того чтобы в замкнутой системе привода при обработке заданного углового перемещения происходило управление двигателем, близкое к старт-стопному, необходимо обеспечить вполне определенное, соответствующее этому перемещению, значение передаточного коэффициента РП [4].

Для такой системы при настройке на оптимум по модулю может быть использован пропорциональный регулятор, передаточный коэффициент усиления пропорционального канала регулятора контура положения  $k_{рп}$  представлен в виде уравнения [4]:

$$k_{рп} = \frac{k_{дс} \cdot Q_{опт}}{2 \cdot T_{\omegaз} \cdot k_{ду}} \quad (5.9)$$

–  $T_{\omegaз}$  – эквивалентная постоянная времени замкнутого КРП, с.

$$T_{\omegaз} = 2 \cdot T_{\mu} \quad (5.10)$$

–  $T_{\mu}$  – малая постоянная времени КРП, с [4].

$$T_{\mu} = \frac{L_{я}}{R_{я}} \cdot \frac{T_{я}}{3} = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{0.07} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-4}}{3} = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (5.11)$$

Далее рассчитана эквивалентная постоянная времени замкнутого КРП:

$$T_{\omega_{\text{з}}} = 2 \cdot 1.33 \cdot 10^{-4} = 2.66 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (5.12)$$

$$k_{\text{рп}} = \frac{k_{\text{дс}} \cdot q_{\text{опт}}}{2 \cdot T_{\omega_{\text{з}}} \cdot k_{\text{дч}}} = \frac{0.01 \cdot 20}{2 \cdot 2.66 \cdot 10^{-4} \cdot 4} = 93 \quad (5.13)$$

В соответствии с структурной схемой на рисунке 5.7 построена модель рисунок 5.9, работающая в режиме больших отклонений, и получены графики скорости поворота рабочего органа и угол, на который он повернётся рисунок 5.10:

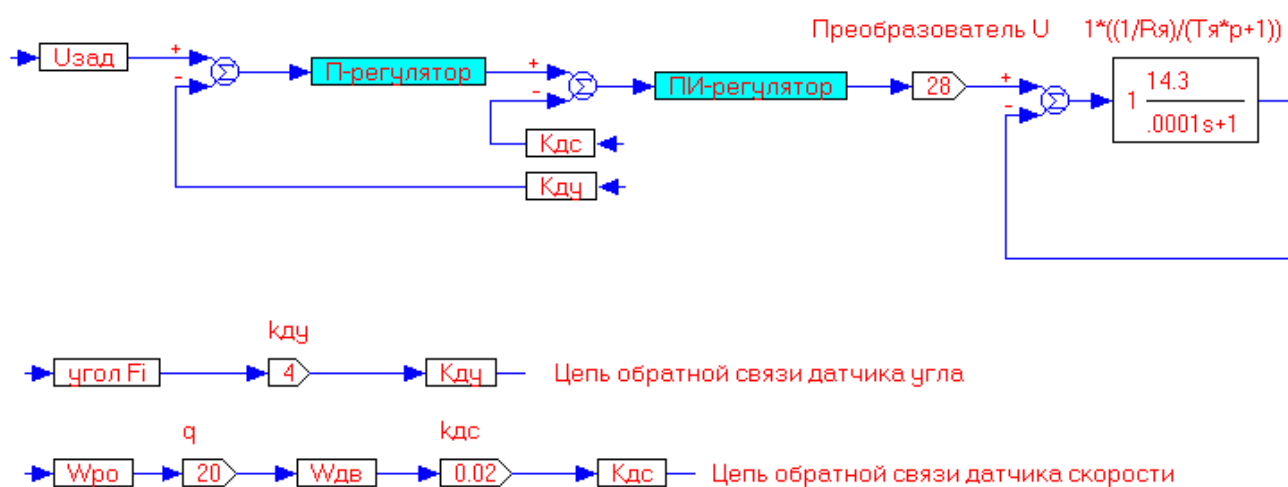


Рис. 5.9 – Математическая модель КРП и КРС



Рис. 5.10 – Диаграмма работы привода при старт-стопном управлении

График на рисунке 5.10 отличается от идеального примера старт-стопного управления отработки угла, так как момент двигателя с ростом скорости падает, составляющие момента сопротивления растут и влияют на отработку угла. Автору работы понятно, что для этих целей больше подходит параболический регулятор, но задача по настройке КРП была выполнена и без него. Далее будет решена следующая задача – расчёт блока электронной аппаратуры.



## 6. РАЗРАБОТКА БЛОКА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ

Блок электронной аппаратуры электропривода является главным объектом разработки. Позицию центрального элемента занимает микроконтроллер, на который приходят показания всех датчиков и сигнал управления приводом от основной системы, запитывается он от преобразователя бортового напряжения в напряжение питания микроконтроллера. Далее от микроконтроллера идёт обратная связь на блок телеметрии летательного аппарата, а управляющие сигналы идут к драйверам, которые усиливают этот сигнал и передают его на вход преобразователя напряжения или как его ещё принято называть силового инвертора. Силовой инвертор преобразует бортовой ток постоянного напряжения в трёхфазный, который идёт на обмотки для реализации векторного управления вентильным двигателем. Ниже проиллюстрировано описание функциональной схемы электронного блока управления.

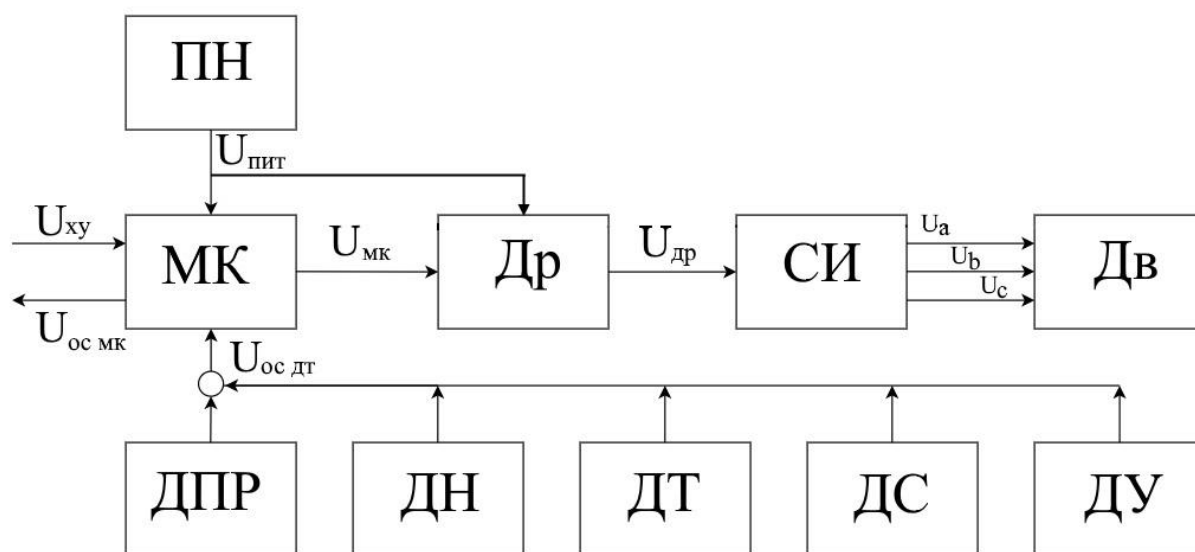


Рис. 6.1 - Функциональная схема БЭА

Перечень блоков в соответствии с рисунком 6.1

1. ПН – блок преобразователя напряжения.
2. МК – микроконтроллер.
3. Др – драйверы.
4. СИ – силовой инвертор.
5. Дв – исполнительный двигатель.
6. ДН – датчик напряжения.
7. ДТ – датчик тока.
8. ДС – датчик скорости.
9. ДУ – датчик угла.

Перечень сигналов в соответствии с рисунком 6.1

1.  $U_{ху}$  – сигнал управления приводом [В].
2.  $U_{ос\text{ МК}}$  – сигнал обратной связи идущий на блок телеметрии [В].
3.  $U_{пит}$  – напряжение питания МК [В].
4.  $U_{ос\text{ ДТ}}$  – сигнал обратной связи датчиков привода [В].
5.  $U_{МК}$  – ШИМ-сигнал с МК [В].
6.  $U_{др}$  – напряжение обратной связи [В].
7.  $U_a, U_b, U_c$  – фазное напряжение вентильного двигателя [В].

## 6.1. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ БЛОКА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

На основе учебной программы и опыта пользования, для разработки был выбран микроконтроллер модели STM32F303CBT6.

Далее идёт расчёт электроники, начиная с конечных элементов силового инвертора, так как требования к ним известны, то определяются параметры транзисторов. В преобразователе напряжения силовой транзистор работает в режиме ключа, для данного, относительно небольшого, напряжения питания подойдут MOSFET-транзисторы. Расчёт производится с запасом, чтобы ключи могли выдержать перегрузки – максимальные напряжение и ток.

$$U_{max} = U_{пит} \cdot 2 = 56 \sim 60 \text{ В} \quad (6.1)$$

$$I_{max} = I_{я} \cdot 2 \dots 3 = 61 \cdot 2 \dots 3 = 120 \dots 180 \text{ А} \quad (6.2)$$

Под рассчитанные параметры подбирается модель транзистора, подходит модель IRFS3206PbF, с параметрами:

- $U_{max} = 55 \dots 60 \text{ В};$
- $I_{max} = 210 \text{ А}.$

При разработке силового инвертора нужно, чтобы росло КПД преобразователя напряжения, а тепловые потери снижались. Наибольшие активные потери происходят во время включения транзистора на канале Сток-Исток (Drain-Source). Чтобы определить относительный уровень потерь, определяется скважность включения транзистора. Скважность включения – это отношение длительности включения ко всему периоду ШИМ-импульса, рисунок 6.2.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

Далее произведён расчёт скважности, которую сможет обеспечить выбранная модель транзистора, чтобы понять удовлетворяют ли требованиям тепловые потери на этом ключе. Оптимальным диапазоном скважности включения является 1-5% от длительности импульса.

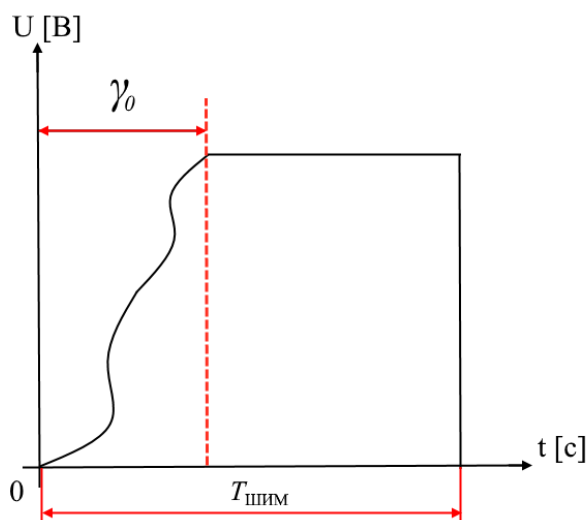


Рис. 6.2 – Скважность времени включения

Для начала рассчитывается частота ШИМ сигнала, чтобы определить длительность её импульса. Оптимальная частота переключения должна быть в 10 раз больше постоянной времени, которая определена в выражении 3.16.

$$f_{\text{ШИМ}} = \frac{10}{T_{\text{я}}} = \frac{10}{1 \cdot 10^{-4}} = 100 \cdot 10^3 \text{ Гц} \quad (6.3)$$

Длительность импульса  $T_{\text{ШИМ}}$  – величина обратная частоте следования импульсов  $f_{\text{ШИМ}}$ , в данном случае  $T_{\text{ШИМ}} = 1 \cdot 10^{-5}$  секунды. Далее находится скважность включения транзистора.

$$\gamma_0 = \frac{t_r + t_{d(\text{on})}}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{(82+19) \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-5}} = 0.01 \quad (6.4)$$

–  $t_r$  – время нарастания импульса открытия (передний фронт), взятое из справочника, с;

–  $t_{d(on)}$  – время включения транзистора, взятое из справочника, с.

При переводе значения скважности из относительных единиц в проценты, размер скважности получается 1 процент. При сравнении с оптимальным диапазоном скважности подтверждается, что скважность включения транзистора этой модели подходит, а значит, режим тепловых потерь будет в допустимых пределах.

Далее рассчитываются параметры драйвера, и определяется его модель. Ключевым параметром драйвера является ток затвора для питаемого им транзистора (gate)  $I_g$ , он находится по формуле:

$$I_g = \frac{P_{DRV}}{\Delta U_g} \quad (6.5)$$

–  $P_{DRV}$  – требуемая мощность драйвера, Вт;

–  $\Delta U_g$  – фактический размах напряжения на выходе драйвера, 15 В.

Далее находится требуемая мощность драйвера по формуле:

$$P_{DRV} = Q_g \cdot f_{IN} \cdot \Delta U_g \quad (6.6)$$

–  $Q_g$  – заряд затвора (паразитная ёмкость), берётся из характеристик модели транзистора,  $170 \cdot 10^{-9}$  Кл;

–  $f_{IN}$  – частота коммутации ключа, берётся равной максимальной частоте ШИМ-сигнала,  $10^5$  Гц.

Производится расчёт требуемой мощности драйвера:

$$P_{DRV} = Q_g \cdot f_{IN} \cdot \Delta U_g = 170 \cdot 10^{-9} \cdot 10^5 \cdot 15 = 0.255 \text{ Вт} \quad (6.7)$$

Полученное значение берётся с двойным запасом  $P_{DRVmax} = 0.255 \cdot 2 = 0.5$  Вт, с учётом полученных величин находится ток затвора.

$$I_g = \frac{P_{DRV}}{\Delta U_g} = \frac{0.5}{15} = 0.033 \text{ А} \quad (6.8)$$

Так как полученное значение тока соответствует установившемуся режиму транзистора, требуется рассчитать пиковый ток нарастания на затворе с учётом скважности включения.

$$I_{gmax} = \frac{I_g}{\gamma_0} = \frac{0.033}{0.01} = 3.3 \text{ А} \quad (6.9)$$

Посчитанные параметры позволяют выбрать модель драйвера, для проектирования подходит модель IRS2186SPBF, с ключевыми характеристиками:

1. Напряжение питания –  $V_{CC} = 10 - 20$  В.
2. Пиковый выходной ток нарастания –  $I_{outmax} = 4$  А.
3. Максимальное входное напряжение –  $V_{IN} = 2.5$  В.
4. Максимальный входной ток –  $I_{IN} = 60 \cdot 10^{-6}$  А.

Далее разрабатываются составляющие основных элементов электрической цепи, и производится подбор их модели. Первым разрабатывается и собирается блок элементов силовых ключей для одной фазы силового инвертора.

Уже подобранные MOSFET–транзисторы работают в режиме силовых ключей. Для оптимизации их работы, уменьшения паразитных характеристик, улучшения температурного режима будут подобраны и обоснованы приведённые далее схемотехнические решения.

Бустрепное – независимое питание.

Интегральные микросхемы (ИС) – драйверы полумостов предполагают включение в общую схему так называемого бустрепного конденсатора для независимого питания цепи управления верхним ключом. Это независимое

питание нужно, чтобы управляющая ИС могла обеспечить полное насыщение управляемого ею полевого транзистора. Если напряжение упадёт ниже определенного уровня, это спровоцирует работу транзистора в режиме рассеяния большой мощности [15].

Суть работы независимого питания, компенсирующего просадки напряжения состоит в следующем. Пока нижний ключ открыт и проводит ток, бустрепный конденсатор подключен через этот открытый нижний ключ к минусовой шине питания, и в это время он может получать заряд через бустрепный диод прямо от источника питания драйвера. Когда нижний ключ закрывается, бустрепный диод перестает подавать заряд в бустрепный конденсатор, так как конденсатор в тот же момент оказывается, отключен от минусовой шины, и теперь может функционировать как плавающий источник питания для схемы управления затвором верхнего ключа полумоста [15].

Такое решение вполне оправдано, ведь зачастую требуемая для управления ключом мощность относительно невелика, и расходуемая энергия может просто периодически пополняться от низковольтного источника питания драйвера прямо в процессе работы силового блока.

Величина бустрепной ёмкости должна быть выбрана расчетным путем. Слишком маленькая емкость может разрядиться раньше времени и закрыть транзистор «верхнего» плеча. Слишком большая емкость может не успевать заряжаться.

Далее выводится формула для нахождения бустрепной ёмкости  $C_{bst}$ . [15]:

$$C_{bst} = \frac{2 \cdot \left( 2 \cdot Q_g + \frac{I_g}{f_{IN}} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs}}{f_{IN}} \right)}{U_{DR} - U_{vf} - U_{ls}} \quad (6.10)$$

- $Q_{ls}$  – заряд сдвига уровня необходимый для одного цикла = 5 нК;
- $I_{cbs}$  – ток утечки бустрепного конденсатора = 30 нА;

- $U_{dr}$ – напряжение питания драйвера = 12 В;
- $U_{vf}$ – прямое падения напряжения на бустрепном диоде=0.67 В;
- $U_{ls}$ – падение напряжения на полевом транзисторе=0.8 В.

При подстановке величин рассчитывается бустрепная ёмкость:

$$C_{bst} = \frac{2 \cdot \left( 2 \cdot 170 \cdot 10^{-9} + \frac{0.033}{10^5} + 5 \cdot 10^{-9} + \frac{30 \cdot 10^{-9}}{10^5} \right)}{12 - 0.67 - 0.8} = 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \quad (6.11)$$

Полученное значение бустрепной емкости является минимальным. Чтобы минимизировать риск от ненадежной работы схемы, разработчики рекомендуют умножить полученный результат на коэффициент 10...15.

При выборе из ряда номиналов конденсаторов, значение ёмкости принимается  $C_{bst} = 1$  мкФ.

Любая микросхема драйвера имеет такой параметр, как максимальный выходной ток. Если ток затвора при открытии/закрытии ключа превысит значение максимального выходного тока, то драйвер может выйти из строя, поэтому, в данном случае, затворный резистор ограничит выходной ток драйвера.

Помимо этого, правильно подобранный резистор не даст ключу самопроизвольно открываться, что иногда может случиться, из-за быстрого изменения напряжения на силовых выводах ключа, например, такое может случиться, когда в полумостовой топологии соседний ключ открывается [16].

Далее находится  $R_{огр}$  для бустрепной цепи по формуле [15]:

$$R_{огр} = \frac{U_{DR}}{I_{gmax} \cdot (R_{DR} + R_{gs})} \quad (6.12)$$

- $R_{DR}$ – выходное сопротивление драйвера, 1.1 Ом;
- $R_{gs}$ – сопротивление затвор-исток, 0.7 Ом.



При подстановке находится значение  $R_{огр}$ :

$$R_{огр} = \frac{12}{3.3 \cdot (1.1 + 0.7)} = 2.02 \text{ Ом} \quad (6.13)$$

С учётом температурного коэффициента сопротивления, при выборе из ряда номинальных сопротивлений E12, ограничивающее сопротивление принимается  $R_{огр} = 2 \text{ Ом}$ .

Также важной характеристикой является рассеиваемая мощность транзистора, вычислим её по формуле [17]:

$$P_{огр} = \frac{Q_g}{2} \cdot U_{DR} \cdot f_{IN} \cdot \frac{R_{DR}}{R_{DR} + R_{огр}} \quad (6.14)$$

$$P_{огр} = \frac{170 \cdot 10^{-9}}{2} \cdot 12 \cdot 10^5 \cdot \frac{1.1}{1.1 + 2} = 0.036 \text{ Вт} \quad (6.15)$$

В соответствии с допустимыми номиналами рассеиваемой мощности резисторов,  $P_{огр}$  принимается равным 0.05 Вт.

При известных параметрах бустрепной цепи, определяется диод модели SR-506. С допустимым обратным напряжением 100 В, что больше чем двойной размах амплитуды напряжения питания и прямым протекающим током 5А.

Так же есть возможность улучшить режим работы силовых ключей с помощью снабберных конденсаторов. Снабберные конденсаторы подключаются параллельно полупроводниковым приборам для ослабления больших бросков напряжения, возникающих при их переключении на высокой частоте [17].

Далее произведён расчёт ёмкости снабберного конденсатора по формуле [16]:

$$C_{snab} = \left( \frac{I_{я} \cdot \sqrt{L_p}}{U_{пит}} \right)^2 = \left( \frac{61 \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-8}}}{28} \right)^2 = 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \quad (6.16)$$

При выборе из ряда номиналов ёмкость конденсатора принимается  $C_{snab} = 47 \text{ нФ}$ .

Полученные элементы собираются в схему силовых ключей для одной фазы якорной обмотки с помощью конструкторской программы DipTrace рисунок 6.3.

Управление цепью силовых ключей происходит за счёт управляющего напряжения с драйвера, которое подаётся на базу транзистора и открывает его поочерёдно с парным транзистором противоположного плеча. При известной модели драйвера и понятом принципе работы блока, может быть собрана цепь драйвера под управлением микропроцессора рисунок 6.4.

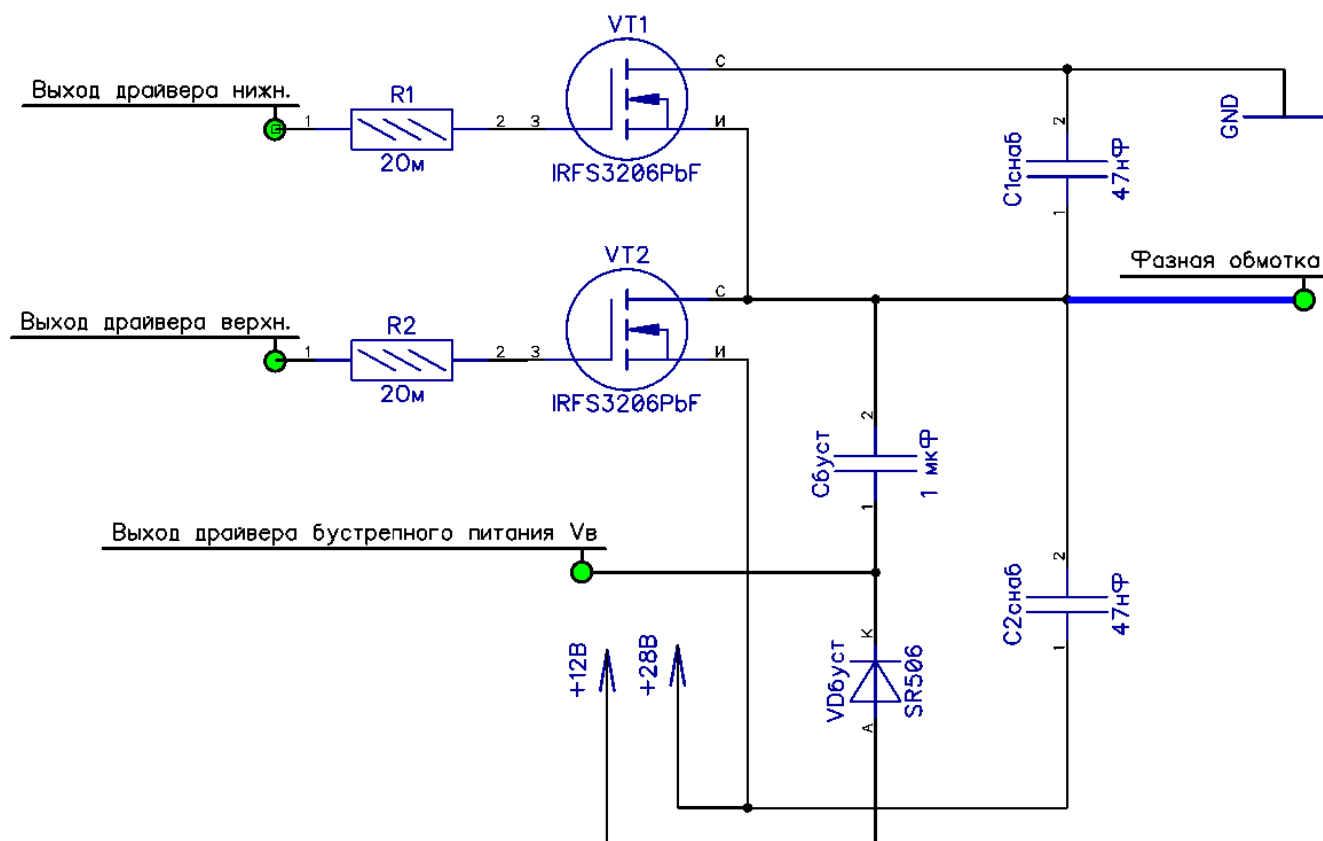


Рис. 6.3 – Блок силовых ключей для одной фазы.

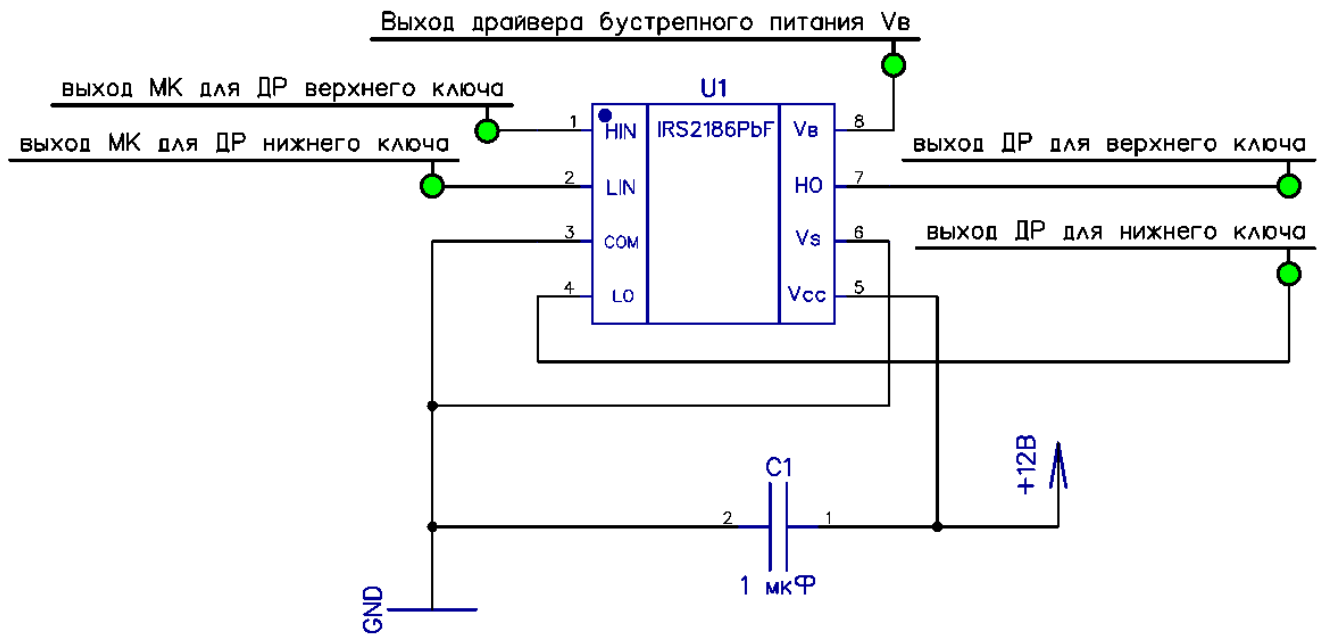


Рис. 6.4 – Блок управляющего драйвера для одной фазы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования литературы и положительного опыта в проектировании силовых приводов для летательных аппаратов, среди различных типов был выбран электропривод. В ходе работы с учётом специфики системы, в которой должна функционировать электрическая машина были произведены расчёт и моделирование системы привода, с последующей оптимизацией.

В конечном итоге был рассчитан исполнительный двигатель, передаточное число редуктора. После моделирования подтвердили правильность расчётов, для модели были настроены контуры регулирования скорости и положения. Рассчитаны основные элементы блока электронной аппаратуры. Проведено исследование схемотехнических решений для улучшения работы отдельных блоков электрической схемы.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Космонавтика России - <https://eam.su/peredatochnoe-chislo-i-otnoshenie-reduktory.html>
2. Б.Г. Крымов, В.Г. Стеблецов. Исполнительные устройства систем управления летальными аппаратами.
3. Ракета-носитель Electron - <https://habr.com/ru/post/404025/>
4. С.Г. Воронин. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. Часть 1.- Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 171 с.
5. Антивибрационный муфты - <http://www.rezinoviy-compensator.ru/articles.html>
6. С.Г. Воронин, А.И. Согрин, К.В. Романов. Выбор параметров быстродействующего электропривода – ЮурГУ, г. Челябинск. (Основной источник информации)
7. Механический редуктор // Википедия. – [http://ru.wikipedia.org/wiki/Механический\\_редуктор](http://ru.wikipedia.org/wiki/Механический_редуктор).
8. Куклин Н.Г., Куклина Г.С. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей техникумов. – 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с., ил.
9. И.Е. Овчинников. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность)/ И.Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб. : КОРОНА-Век, 2005. – 336с.
10. Вентильный двигатель - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный\\_двигатель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вентильный_двигатель).
11. Методы управления приводом – Скалярный и Векторный - <https://rusautomation.ru/stati/metody-upravleniya-elektroprivodom>
12. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами – Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.816.02 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

13. А.А. Усольцев «ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА». Учебное пособие. Санкт-Петербург. 2009. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
14. Механические характеристики элементов привода -  
[https://klinachevnr.ru/privod/glv\\_010.htm](https://klinachevnr.ru/privod/glv_010.htm)
15. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 416 с.: ил.
16. Резистор в зепи затвора или как сделать правильно -  
<https://habr.com/ru/post/451152/>
17. Что такое снаббер? -  
<https://zen.yandex.ru/media/id/5c615e3c9e391400ae5f8253/chto-takoe-snabber-5c682073545ec900ae68fbf1>