

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

Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/В.Г. Дегтярь/

_____/2018г.

Выбор электромеханических узлов и моделирование переходных процессов
электропривода рулевой машины

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ 13.03.02.2018.163.1— ПЗ ВКР

Руководитель проекта, (доктор
технических наук, профессор)

_____/С. Г. Воронин/

_____/2018г.

Астафьев Егор Александрович
студент группы П-428

_____/Е.А. Астафьев/

_____/2018г.

Нормоконтролер (кандидат
технических наук, доцент)

_____/П.О. Шабуров

_____/2018г.

АННОТАЦИЯ

Астафьев Е.А. Выбор
 электромеханических узлов и
 моделирование переходных процессов
 электропривода рулевой машины –
 Челябинск: ЮУрГУ, П-428, 71 стр., 27
 ил., 2 табл., библиогр. список – 23
 наим.

Цель – настроить систему подчиненного регулирования для рулевого управления сопла ракеты.

Задачи – изучить отечественную и зарубежную литературу по данному вопросу, выбрать двигатель для электропривода сопла ракеты, рассчитать передаточное число редуктора для обеспечения максимального быстродействия системы и настроить трехконтурную систему подчиненного регулирования.

Рассматриваемая цель является актуальной в современном ракетостроении, так как от качества настройки системы автоматического управления зависит работоспособность всего устройства.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Астафьев Е.А.</i>			<i>Выбор электромеханических узлов и моделирование переходных процессов электропривода рулевой машины</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Воронин С. Г.</i>					2	71
<i>Реценз.</i>						<i>ЮУрГУ Летательные аппараты</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шадуров П. О.</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Дегтярь В. Г.</i>						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПРИНЦИПЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ (КО) В ИНЕРЦИАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	7
1.1 Устройства управления положением.....	7
1.1.1 Реактивные двигатели.....	8
1.1.2 Двигатели-маховики.....	9
1.1.3 Силовые гироскопические устройства.....	11
1.2 Виды механических передач	12
1.2.1 Зубчатые передачи.....	13
1.3 Червячные передачи	14
1.3.1 Планетарные передачи.....	15
1.3.2 Волновые механические передачи.....	16
1.3.3 Фрикционные передачи	17
1.3.4 Передача винт-гайка (шариковая передача).....	18
1.4 Рулевые машины принципы и требования.....	19
1.4.1 Гидравлические рулевые машины	20
1.4.2 Электрогидравлические рулевые машины	22
1.4.3 Электрические рулевые машины	24
1.4.4 Требования к динамике рулевого привода как исполнительного элемента системы стабилизации	28
1.4.5 Заключение к первой главе.....	32
2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	33
2.1 Моменты, действующие в электроприводе	35
2.2 Приведение сил и моментов	37
2.3 Приведение инерционных масс электропривода	39

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		3

2.4	Выбор двигателя	41
2.5	Расчет передаточного числа редуктора	42
3	РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ КАЖДОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ	46
3.1	Принцип подчиненного регулирования	46
3.2	Настройка контура тока	49
3.3	Настройка контура скорости	51
3.4	Настройка контура положения	55
4	МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И СНЯТИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	57
4.1	Частотные характеристики звеньев контура тока	58
4.2	Настройка контура скорости	61
4.3	Настройка контура положения	65
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	69

ВВЕДЕНИЕ

Рулевая машина предназначена для перемещения рулевой поверхности согласно электрическим сигналам системы управления летательного аппарата. Для движения ракеты по заданной траектории необходимо точно задавать положение сопла. При этом рулевая машина должна отрабатывать перемещение без значительных перерегулирований и с максимальным быстродействием.

Для этих целей разрабатываются следящий привод в режиме позиционирования. Это замкнутые электроприводы, которые управляют перемещением рабочего органа и обеспечивают его стабилизацию относительно некоторой базовой системы координат. Режим позиционирования подразумевает, что электропривод должен обеспечить перемещение рабочего органа за строго определенное время.

Целью выпускной квалификационной работы, является настройка системы подчиненного регулирования рулевого управления соплом ракеты.

В соответствие с поставленной целью, необходимо решить следующие задачи:

Аналитические задачи

Изучить научную литературу, объясняющую принципы и устройство управления положением космических объектов в инерциальном пространстве, принципы выбора электрических двигателей, передаточного числа редуктора и принципы настройки системы автоматического управления электропривода.

Проектные задачи

- 1) Рассчитать требования к двигателю по добротности и мощности.
- 2) Выбрать двигатель и найти необходимое передаточное число редуктора, исходя из обеспечения максимального быстродействия электропривода.
- 3) Настроить трехконтурную систему подчиненного регулирования, обеспечивающую достаточную устойчивость и точность управления.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

4) Произвести моделирование разработанного электропривода в программе Jigrein, снять частотные характеристики контуров электропривода и сравнить с расчетными параметрами.

Предмет исследования – Теория автоматического управления.

Объект исследования – электропривод исполнительного органа поворота сопла ракеты.

Степень разработанности в литературе – при создании системы управления летательными аппаратами, вопрос уменьшения массогабаритных размеров ставился неоднократно и всегда являлся решающим при проектировании готового решения управления исполнительным органом поворота сопла или других элементов ракеты. Но конкретного технического решения, дающего возможность снизить вышеуказанные показатели за счёт внедрения микропроцессорной техники, на сегодня в научной литературе не приведено.

Техническая новизна – заключается в разработке электропривода для управления соплом ракеты для конкретных ее параметров.

Исходные данные, необходимые для разработки функциональной схемы, представлены в таблице 2 на странице 33.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

1 ПРИНЦИПЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ (КО) В ИНЕРЦИАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

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

Управляющий момент реактивные двигатели создают за счёт реакции струи газов, выпускаемых из сопла. Их ось располагается на некотором удалении (плече) относительно центра масс КЛА. Для получения возможно большего момента сопла располагаются либо на поверхности КЛА, либо выносятся на специальных штангах за его пределы.

Силовые гироскопические устройства и двигатели - маховики создают управляющий момент за счёт изменения момента количества движения маховиков или гироскопов, вращающихся внутри КЛА. Применение подобных управляющих устройств возможно лишь в условиях космического полёта.

Таким образом, управляющие устройства, использующие реактивные двигатели создают внешний момент. Двигатели-маховики и гироскопические устройства создают внутренний момент [17].

1.1 Устройства управления положением

При движении космического летательного аппарата (КЛА) как твёрдого тела различают поступательное движение — движение центра масс аппарата относительно Земли — и вращательное движение — вращение аппарата вокруг его центра масс. Для того что бы космический летательный аппарат не терял ориентации в пространстве существуют специальные системы и устройства его положением с помощью которых осуществляется управление и контроль положением космического летательного аппарата [23].

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

1.1.1 Реактивные двигатели

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

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

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

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

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

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

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

В качестве рабочего тела могут использоваться водород, гелий, метан, азот и воздух. Водород и гелий дают наибольшие значения удельных импульсов, приближающиеся к удельным импульсам однокомпонентных двигателей. Однако в связи с малым молекулярным весом они требуют больших баллонов для хранения. Двигательные установки на метане, азоте и воздухе более предпочтительны. Их весовые характеристики примерно равнозначны. Воздух является самым дешёвым и обеспечивает наименьшую массу двигательной установки [1].

В данном дипломном проекте будут рассматриваться газовые рули, а именно струйные (газовые) сопла.

1.1.2 Двигатели-маховики

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

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

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						9
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

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

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

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

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

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

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

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

Считается, что в некоторых случаях роль гиромаховика может играть часть КЛА, в которой размещается оборудование, не требующее определённой ориентации. Такие КЛА называются аппаратами с двойным вращением [1].

1.1.3 Силовые гироскопические устройства

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

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

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

Шаровой маховик обладает рядом достоинств по сравнению с обычными маховиками, установленными по трём осям: позволяет управлять угловыми движениями аппарата вокруг трёх осей одновременно, гироскопически не связан с корпусом, отсутствие подшипников повышает надёжность конструкции [1].

1.2 Виды механических передач

Механическая передача – устройство, позволяющее передать механическое движение к исполнительным органам машины от двигателя. Может осуществляться с изменением значения и направления скорости движения, с преобразованием вида движения. Такие устройства необходимы из-за нецелесообразности, или даже невозможности непосредственного соединения рабочего органа с валом двигателя. Механизмы вращательного движения позволяют осуществить равномерное и непрерывное движение с наименьшими потерями энергии на преодоление трения и наименьшими инерционными нагрузками.

Виды механических передач вращательного движения:

- по способу передачи движения: на передачи зацеплением (зубчатые, цепные, червячные) и трением (ременные, фрикционные);

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						12
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- по соотношению скоростей ведомого и ведущего звеньев: на ускоряющие (мультипликаторы) и замедляющие (редукторы);
- по взаимному расположению осей ведомого и ведущего валов: на передачи с пересекающимися, параллельными и перекрещивающимися осями валов [3].

1.2.1 Зубчатые передачи

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

Преимущества зубчатых передач:

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

Недостатки зубчатых передач:

- шум при работе на высоких скоростях;
- невозможность плавного изменения передаточного числа;
- высокие требования точности изготовления, сборки и монтажа;
- незащищенность от возможных перегрузок;
- наличие вибраций, возникающих в результате недостаточно точного изготовления и (или) неточной сборки передач [15].

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

1.3 Червячные передачи

Данная передача применяется для передачи вращения от одного вала к другому, если оси валов перекрещиваются. Угол перекрещивания обычно равен 90° . Наиболее распространена червячная передача (см. рисунок 1.1), состоящая из червячного колеса и архимедова червяка, т.е. винта, который имеет трапецеидальную резьбу с углом профиля в осевом сечении, равным двойному углу зацепления ($2\alpha = 40$).

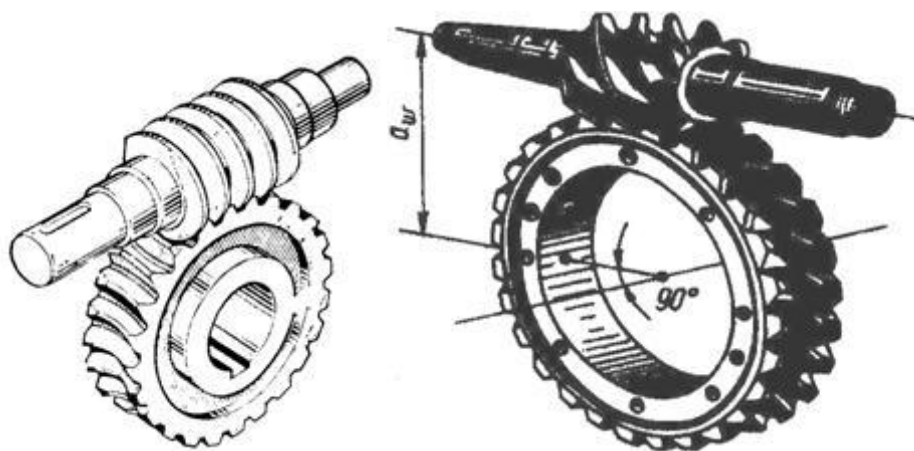


Рисунок 1.1 – Червячная передача

Червяки различаются по форме поверхности, на которой расположена резьба: цилиндрические (см. рисунок 1.2, а) и глобоидные (см. рисунок 1.2, б).

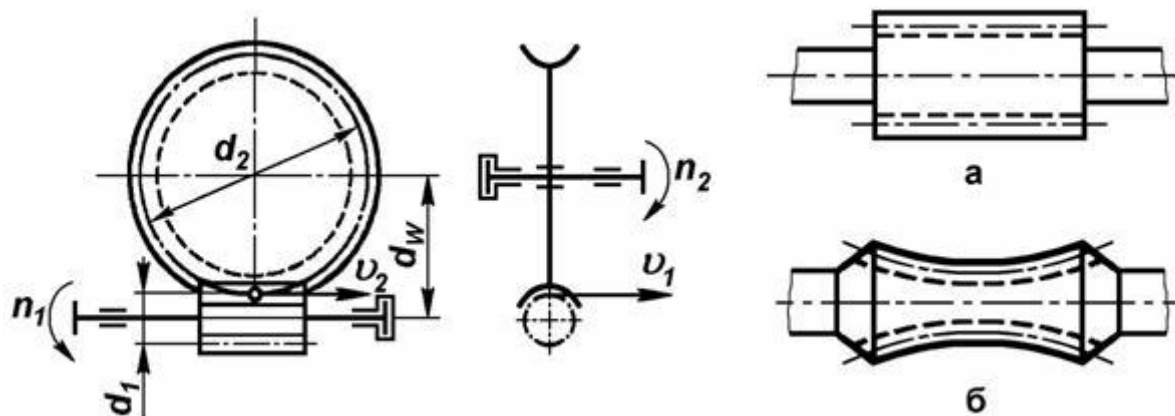


Рисунок 1.2 – Виды червяков

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Архимедовы червяки находят наибольшее применение в машиностроении, так как технология их производства проста и отработана [15].

1.3.1 Планетарные передачи

Это передачи, которые содержат зубчатые колеса с перемещающимися осями (см. рисунок. 1.3). Передача состоит из центрального колеса 1 с наружными зубьями, сателлитов 2, наружного колеса 3 с внутренними зубьями и водила Н. Сателлиты вращаются вокруг собственных осей и в то же время перемещаются вместе с осью вокруг центральной оси, т.е. они совершают движение, аналогичное движению планет.

Преимущества планетарных передач:

- нагрузка передается одновременно через несколько сателлитов, что уменьшает силы, действующие на зубья колес, следовательно, позволяет использовать шестерни меньших диаметров и масс;
- в планетарных передачах рационально используются колеса внутреннего зацепления, которые обладают большей нагрузочной способностью (по сравнению с колесами наружного зацепления);
- равномерное распределение сателлитов по окружности уравнивает радиальные силы, которые действуют на колеса, и к разгрузке подшипников центральных колес и водила;
- планетарный механизм легко позволяет осуществить компактную конструкцию соосного редуктора (редуктора, оси ведущего и ведомого валов которого совпадают).

Недостатки планетарных передач – повышенные требования к точности изготовления, сборки и монтажа [15].

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

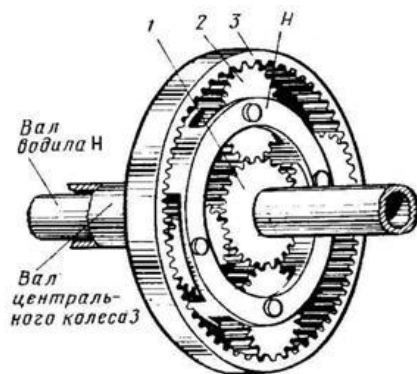


Рисунок 1.3 – Планетарный механизм

1.3.2 Волновые механические передачи

Работа данной передачи основана на принципе волнового деформирования гибкого звена механизма. Волновые зубчатые передачи (см. рисунок 1.4) являются разновидностью выше упомянутых планетарных передач, одно из колес которых гибкое.

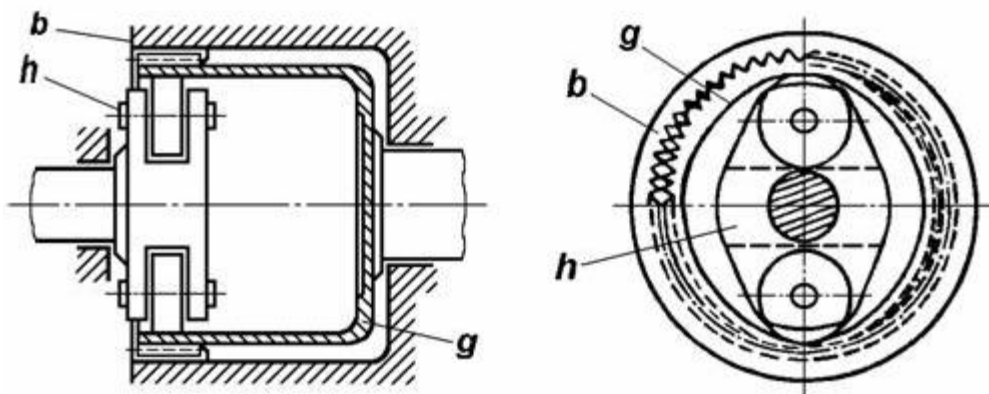


Рисунок 1.4 – Волновая зубчатая передача

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

определённый угол, который определяется соотношением количества зубьев на внутренне и внешнем цилиндре.

Достоинства волновых передач по сравнению с зубчатыми передачами:

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

Недостатки:

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

Волновые передачи применяются в приводах для передачи движения в герметизированное пространство в атомной, химической и космической технике; в кинематических и силовых приводах общего назначения с большим передаточным отношением; в исполнительных быстродействующих механизмах систем автоматического регулирования и управления; в механизмах отсчётных устройств, обладающих повышенной кинематической точностью [15].

1.3.3 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.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

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

В авиастроении данные передачи не применяются. Величина передаваемой мощности обычно не превышает 10 кВт, так как при больших значениях трудно обеспечить необходимое усилие прижатия катков [15].

1.3.4 Передача винт-гайка (шариковая передача)

Шарико-винтовая передача (ШВП) – это линейный механический привод, преобразующий вращение в линейное перемещение и наоборот (см. рисунок 1.5). Конструктивно она представляет собой длинный винт, по которому движется шариковая гайка. Внутри гайки между её внутренней резьбой и резьбой винта по спиралевидной траектории катятся шарики, затем попадая в возвратные каналы – внутренние или внешние.

Их широкое применение определяется тем, что при компактной и простой конструкции они позволяют осуществить медленные и точные перемещения.

В авиастроении ШВП используется в механизмах управления самолётом: для перемещения поворотных стабилизаторов, взлётно-посадочных закрылков и др.

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

- высокая нагрузочная способность;
- бесшумность и плавность работы;
- высокая точность передачи;
- возможность использования с двигателями небольшой мощности;

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

- 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.



Рисунок 1.5 – Шарико-винтовая передача

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

Данный тип передачи будет использоваться для изменения положения реактивного двигателя [22].

1.4 Рулевые машины принципы и требования

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

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 [23].

1.4.1 Гидравлические рулевые машины

Основное применение в приводах рулевых поверхностей современных самолётов 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 самолёта, 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;

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						20
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- высокий КПД и большой срок службы привода в условиях непрерывных реверсов, троганий и остановок, что даёт 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 надёжность 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.

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

В гидроприводе с объёмным 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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

качестве регуляторов расхода жидкости, подводимой к каждому гидродвигателю, используют дросселирующие гидрораспределители, представляющие собой регулируемые гидравлические сопротивления [23].

1.4.2 Электрогидравлические рулевые машины

Электрогидромеханический привод рулевой поверхности с электрогидравлическими следящими приводами получает все более широкое применение на современных самолётах. Такой привод позволяет наиболее полно реализовать преимущества гидропривода и получить необходимую стабильность характеристик и надёжность 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.

Электрогидравлические приводы (ЭГ) характеризуются отсутствием жёсткой 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, требованием по быстродействию и силовому моменту на выходном валу. Наибольшее распространение получили электрогидравлические РМ (см. рисунок 1.6), управление которыми осуществляется электрическими сигналами, а силовые функции обеспечиваются средствами гидравлики.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

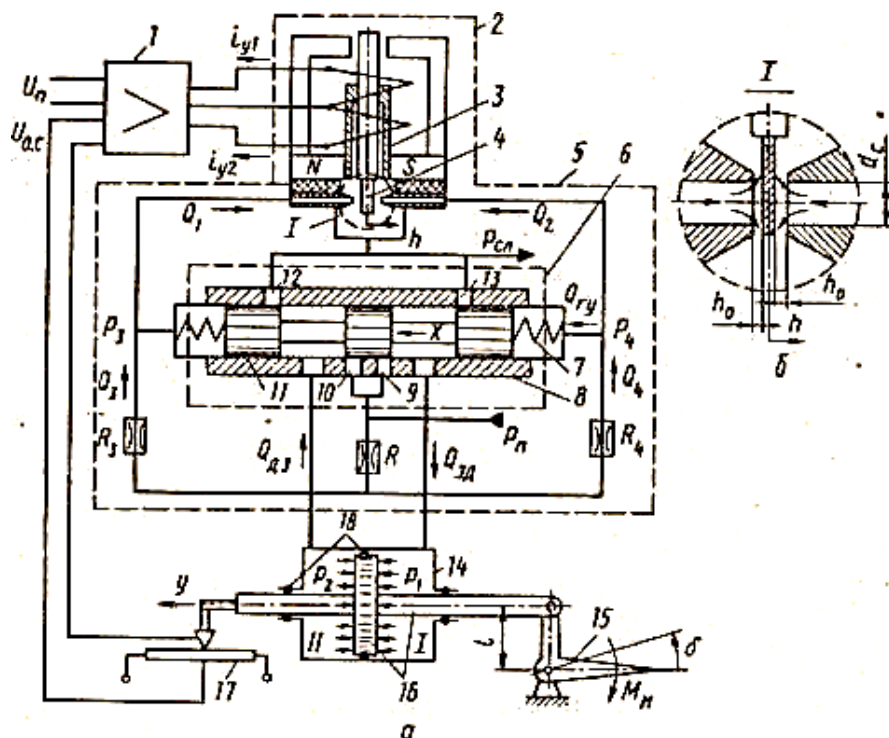


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема электрогидравлического рулевого привода

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.

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

Перемещение рабочего поршня 8 будет происходить до тех пор, пока магнитные потоки на обмотке управления и обмотке ПОС не скомпенсируют друг друга [6].

1.4.3 Электрические рулевые машины

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

По конструкции якоря двигателя бывают:

- с цилиндрическим гладким якорем, у которых витки обмотки якоря приклеиваются к нему с помощью специальных смол с ферромагнитным наполнителем;
- с дисковым якорем, представляющим собой тонкий диск из пластмассы, на который различным образом крепится якорная обмотка;
- с полым немагнитным якорем, у которых якорная обмотка впрессована в стакан-якорь из немагнитного материала.

Указанные модификации 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 механизм или силовой электропривод.

Важнейшими характеристиками исполнительных электромеханизмов являются:

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24

- механическая характеристика, устанавливающая зависимость между скоростью (перемещением) и моментом (силой) исполнительного элемента в функции параметра управления (напряжения или тока), например, $M = f(\Omega, U_{я})$ (см. табл. 1);
- регулировочная характеристика, устанавливающая зависимость между управляемым параметром (скоростью, моментом) и управляющим сигналом (напряжением, током) при постоянном значении величины нагрузки M_n , например, $\Omega = f(U_{я}, M_n)$ (см. табл. 1).

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

В соответствии с функциональной схемой в приводе используется исполнительный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. Привод предназначен для компенсации ошибки между требуемым положением руля $\delta_{ж}$, 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 рулём поворачивается движок потенциометра приёмника (ПП). Разность напряжений ПД и ПП создаёт напряжение ΔU ошибки, которое заставляет ИД поворачивать руль в направлении устранения углового рассогласования $\Theta = \delta_{ж} - \delta$.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

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

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

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

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

Рассогласование между требуемым $\delta_{ж}$ и истинным δ положениями руля фиксируется элементами синхронной связи – потенциометрами датчиков (ПД) и приёмника (ПП). Напряжение ΔU ошибки в усилительном тракте привода через усилители У1 и У2 подаётся на обмотки управления муфтами. Величина и знак момента на выходном валу привода, связанного с выходным валом исполнительного механизма редуктором с передаточным отношением q , будут определяться тем, какая из муфт развивает больший момент. Под действием момента от блока муфт выходной вал, а вместе с ним и поверхность управления (рули горизонтальные и вертикальные, элероны, триммеры и т. п.) поворачиваются в направлении требуемого положения $\delta_{ж}$, т. е. в направлении уменьшения ошибки.

Из механической и регулировочной характеристик привода с муфтами (см. табл. 1) следует, что в таком типе привода регулируется момент M , развиваемый блоком муфт; управляющим сигналом муфт является ток $i_y = i_1 - i_2$ [9].

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						27
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 1 – Типы приводов

Тип привода Схемы характеристики	Привод постоянного тока	Привод переменного тока	Муфтаый привод
Функциональная схема			
Механические характеристики			
Регуляционные характеристики			
Кинематика исполнительного механизма			

1.4.4 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 $\omega_{ф.в}$ должна быть большей, 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 в процессы наведения и стабилизации ЛА. Если, например, считать допустимым, что система стабилизации вносит в систему наведения фазовые искажения (сдвиги по фазе), не превышающие $—15^\circ$, а искажения по амплитуде не более 10 %, то в этом случае полосы пропускания систем наведения $\omega_{с.н}$ и стабилизации $\omega_{ст}$ должны удовлетворять условию:

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{с.н}} \geq 3. \quad (1.1)$$

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 манёвренные возможности ЛА. Приблизённо принято считать, что система стабилизации обладает достаточным быстродействием, если выполняется условие:

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

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

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

Коэффициент K_B можно рассматривать как коэффициент требуемого быстродействия рулевого привода.

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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						30
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

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:

$$\frac{\omega_{п.пр}}{\omega_{ст}} \gtrsim 3 \dots 3,5. \quad (1.4)$$

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 [7].

1.4.5 Заключение к первой главе

В настоящее время электрические рулевые машины используют чаще как в нашей стране, так и за рубежом. Этому способствует широкое внедрение в схемы управления силовой полупроводниковой техники, микропроцессорного управления, появление электродвигателей с высоким коэффициентом полезного действия, достигающим в лучших образцах почти 90 %, высокие динамические характеристики, которые позволяют создавать следящие приводы с широкой полосой пропускания. Фактором, ограничивающим применение таких электродвигателей, как двигатели постоянного тока (ДПТ) классического исполнения является наличие коллекторного узла. Щеточно-коллекторный переход ДПТ из-за наличия трения создаёт нечувствительность двигателя к «малым» сигналам. Кроме того, использование подобных ДПТ в рулевых и других приводах ЛА ограничивает высоту их применения. Однако все эти недостатки устранены в бесколлекторных двигателях постоянного тока (БДПТ), а также в двигателях переменного тока.

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 объёмно-массовым показателям.

Исходя из заявленных технических требований, и перечисленных достоинств электрических рулевых машин, было сделано решение использовать электрическую рулевую машину с шарикоподшипниковым редуктором для выполнения задачи дипломного проекта.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		32

2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В соответствии с техническими требованиями рассмотрим исходные параметры, необходимые для разработки функциональной схемы (см. табл. 2).

Таблица 2 – Исходные данные

$k_{ш}$ Н·м/рад	k_f Н·м/с	$M_{ст}$ Н·м	J_p кг·м ²	δ_m рад	t_0 с
60/-30	0,3	15	0,08	0,4	0,1

где $k_{ш}$ – коэффициент шарнирной нагрузки;

k_f – коэффициент скоростного демпфирования манипулятора;

$M_{ст}$ – максимальное значение момента сухого трения;

J_p – момент инерции манипулятора;

δ_m – максимальное отклонение манипулятора;

t_0 – минимальное время отработки.

В большинстве случаев электропривод систем управления представляет собой следящую систему, состоящую из исполнительного элемента, преобразующего электрическую энергию в механическую, усилительно преобразовательных устройств и измерителей угла рассогласования. Следящие электроприводы или системы управления положением 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. Следящие электроприводы могут обеспечивать как линейное, так и угловое перемещение регулируемого объекта. Например, это может быть система наведения солнечной батареи, телескопа и др. или система управления подачей резца в станке с программным управлением.

Во многих случаях следящие электроприводы строятся по принципу подчиненного регулирования на основе двигателей постоянного тока, коллекторных или вентильных. Поэтому основное внимание мы уделим именно таким приводам. Функциональная схема привода представлена на рисунке 7, где обозначено: РП – регулятор положения; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; Д – двигатель; ОР – объект регулирования; ДП, ДС, ДТ – датчики соответственно положения, скорости и тока.

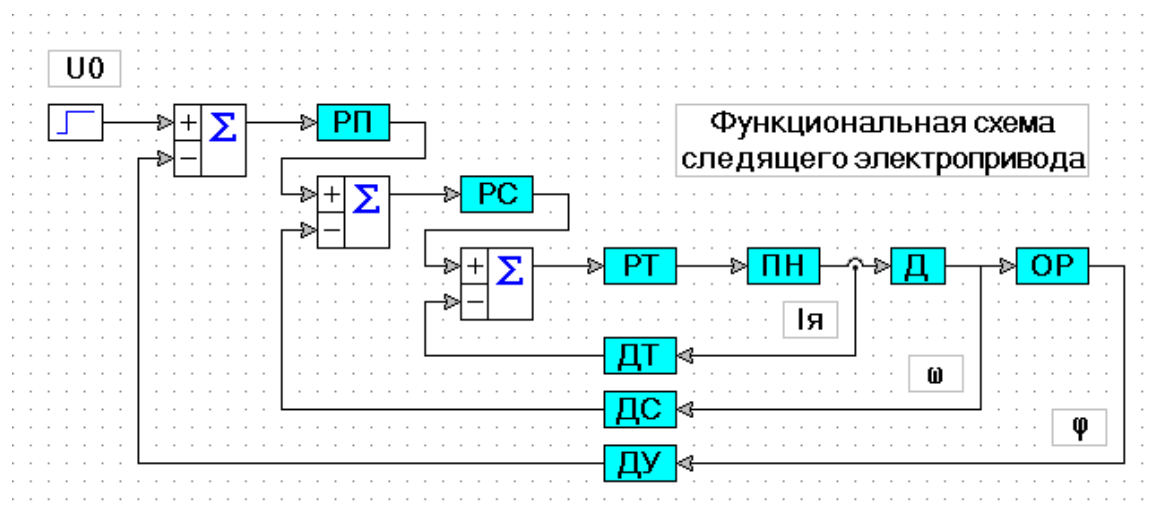


Рисунок 2.1 – Функциональная схема следящего электропривода

Как видно из рисунка 2.1, электропривод содержит три контура регулирования: положения, скорости и тока. Внутренние контуры регулирования (скорости и тока) строятся, как это было показано при рассмотрении систем регулирования скорости. Внешний контур содержит датчик положения объекта относительно базовой системы координат. Это может быть датчик углового положения (сельсин, редуктосин, вращающийся трансформатор и др.) или любой датчик линейного перемещения. Сигнал с выхода ДУ сравнивается с управляющим сигналом U_0 , определяющим положение объекта. По результату сравнения РП – вырабатывается сигнал U_{pc} регулирования скорости, который, в конечном счете, обеспечивает вращение двигателя и перемещение ОР – на заданный угол или расстояние.

В следящем электроприводе различают два режима работы: позиционирования и слежения. В режиме позиционирования привод должен обеспечить перемещение рабочего органа из одного исходного положения в другое за время не больше заданного. Такое требование выдвигается, например, для привода рулевой машины. При этом траектория перемещения чаще всего не имеет значения, хотя иногда могут выдвигаться требования по монотонности переходного процесса, т.е. отсутствию перерегулирования. Такая задача ставится, например, перед приводами промышленных манипуляторов. Во многих случаях в режиме позиционирования выдвигаются жесткие требования к точности поддержания рабочего органа в заданном положении при наличии внешних возмущений.

В режиме слежения привод должен обеспечить перемещение рабочего органа в соответствии с управляющим воздействием, изменяющимся по произвольному закону, при ошибке, не превышающей заданного значения.

В общем случае качество электропривода оценивается по точности позиционирования, точности слежения, запасу устойчивости и помехоустойчивости.

Известно, что время отработки заданного пути перемещения зависит от соотношения запасов кинетической энергии двигателя и рабочей машины, которое определяется передаточным числом редуктора. Поэтому при проектировании приводов, оптимальных по быстродействию, внимание исследователей привлекает вопрос определения передаточного числа, обеспечивающего, при прочих равных условиях, максимальное быстродействие для заданных двигателя и механизма [5, 7].

2.1 Моменты, действующие в электроприводе

Предположим, что рассматриваемая механическая система состоит из абсолютно жестких элементов и в ней отсутствуют воздушные зазоры. Тогда по движению одного элемента можно судить о движении всех остальных. Обычно в

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						35
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

качестве такого элемента берут двигатель. На механическую 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.

Условно моменты подразделяются на 3 категории:

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

Демпферный момент, или **момент вязкого трения** – это момент который пропорционален скорости вращения или линейного перемещения рабочего органа и меняет свой знак при изменении направления движения. Такой момент возникает, например, при перемещении тела в среде жидкости. Формально он описывается выражением:

$$M_{вт} = k_{вт}\omega, \quad (2.1)$$

где $k_{вт}$ – коэффициент вязкого трения;

ω – скорость вращения.

Реактивный момент или **момент сухого трения** – это момент, который характеризует 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. Момент сухого трения описывается следующей формулой:

$$M_{ст} = M_0 \text{sign}\omega, \quad (2.2)$$

где M_0 – модуль момента сухого трения;

ω – скорость вращения.

В случае линейного перемещении элементов привода 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

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		36

скручивании и сжатии упругих тел), так и независимым от угла поворота или величины линейного перемещения (действие силы тяжести). В статике – 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

$$M_c = M_0 \cdot \text{sign}\omega + (M_n - M_0) \frac{\omega}{\omega_n} s, \quad (2.3)$$

где M_n, ω_n – номинальные момент и скорость рабочего органа соответственно;
 s – показатель степени, определяющий характер изменения его момента при изменении скорости [4, 16, 21].

2.2 Приведение сил и моментов

Предположим, что мы имеем электропривод, который состоит из двигателя, редуктора с передаточным значением 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 2.2). Определим, какой результирующий момент будет действовать на вал двигателя.

Запишем уравнение баланса мощностей, которое при прямом потоке энергии имеет вид:

$$P_c = P_{po} + P_n, \quad (2.4)$$

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:

$$P_c = \frac{P_{po}}{\eta}, \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{P_{po}}{P_c}. \quad (2.6)$$

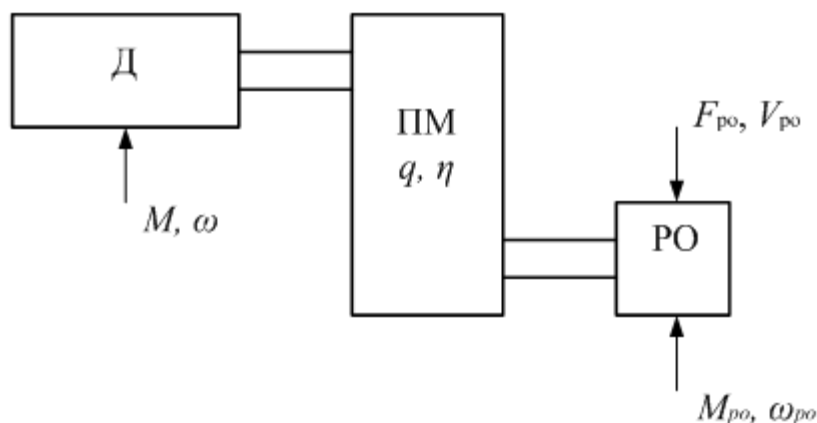


Рисунок 2.2– Приведение моментов и сил

Мощность при вращательном и поступательном движении соответственно:

$$P_c = M\omega, \quad (2.7)$$

$$P_{po} = M_{po}\omega_{po}, \quad (2.8)$$

$$P_{po} = F_{po}V_{po}. \quad (2.9)$$

Подставим последние выражения для мощностей в уравнение (2.5) и получим:

$$M\omega = \frac{M_{po}\omega_{po}}{\eta}, \quad (2.10)$$

$$M\omega = \frac{F_{po}V_{po}}{\eta}. \quad (2.11)$$

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:

$$M = \frac{M_{po}}{q \cdot \eta}, \quad (2.12)$$

$$M = \frac{F_{po} \cdot p}{\eta}, \quad (2.13)$$

где $q = \omega / \omega_{po}$, – передаточное отношение редуктора;

$p = V_{po} / \omega$ – радиус приведения нагрузки.

Запишем уравнение баланса мощностей при обратном потоке энергии:

$$P_c = P_{po} - P_n, \quad (2.14)$$

Отсюда мощность на валу:

$$P_c = P_{po} \cdot \eta. \quad (2.15)$$

Подставляя в (2.14) и (2.15) мощности, выраженные через моменты и раскрывая моменты согласно (2.10) и (2.11), получим уравнения для приведения моментов и сил при обратном потоке энергии при вращательном и поступательном движении соответственно [20]:

$$M = \frac{M_{po} \cdot \eta}{q}, \quad (2.16)$$

$$M = F_{po} \cdot \eta \cdot p. \quad (2.17)$$

2.3 Приведение инерционных масс электропривода

Предположим, 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 приведенной маховой массы на валу двигателя, которая будет эквивалента воздействию всех фактических инерционных масс, движущихся вращательно или линейно. 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 $W_j = m V^2 / 2$, для вращающихся тел $W_k = J \omega^2 / 2$, тогда условие равенства кинетических энергий:

$$J_{np} \frac{\omega^2}{2} = J_{\partial\delta} \frac{\omega^2}{2} + \sum_{s=1}^k J_s \frac{\omega_s^2}{2} + \sum_{i=1}^j m_i \frac{V_i^2}{2}. \quad (2.18)$$

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

$$J_{np} = J_{\partial\delta} + \sum_{s=1}^k \frac{J_s}{q_s^2} + \sum_{i=1}^j m_i \rho_i^2. \quad (2.19)$$

Из (2.19) нетрудно получить уравнения для приведения одной вращающейся и одной движущейся линейно массы соответственно:

$$J_{np} = \frac{J_{po}}{q^2}, \quad (2.20)$$

$$J_{np} = m_{po} \cdot \rho^2. \quad (2.21)$$

Если привести маховую массу двигателя к валу рабочего органа, то:

$$J_{np} = J_{\partial\delta} \cdot q^2. \quad (2.22)$$

Формула (2.22) будет использоваться в дальнейшем [4, 19].

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.4 Выбор двигателя

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

Максимальная скорость привода определяется, как:

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot \varphi_0}{t_0} = \frac{2 \cdot 0,4}{0,1} = 8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.23)$$

Момент рабочего органа:

$$M_{\text{po}} = k_{\text{ш}} \cdot \varphi_0 + \omega_{\max} \cdot k_f + M_{\text{ст}}, \quad (2.24)$$

$$M_{\text{po}} = 60 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,4 + 15 = 42,2 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $M_{\text{ст}}$ – момент сухого трения.

Тогда предполагаемая мощность двигателя:

$$P = \frac{16 \cdot \varphi_0^2 \cdot J_{\text{po}}}{t_0^3} = \frac{16 \cdot 0,4^2 \cdot 0,08}{0,1^3} = 409,8 \text{ Вт}, \quad (2.25)$$

где J_{po} – момент инерции рабочего органа.

Добротность предполагаемого двигателя:

$$D = \frac{8 \cdot \varphi_0 \cdot \sqrt{J_{\text{po}}}}{t_0^2} = \frac{8 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{0,08}}{0,1^2} = 90,5 \frac{\text{Н}}{\text{кг}^{0,5}}. \quad (2.26)$$

Будем считать, что наш двигатель имеет следующие характеристики:

- $P_{\text{н}} = 380 \text{ Вт}$ (номинальная мощность);
- $I_{\text{н}} = 16 \text{ А}$ (номинальный ток);
- $U_{\text{н}} = 28 \text{ В}$ (номинальное напряжение);
- $J_{\text{рд}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (момент инерции двигателя);
- $R_{\text{я}} = 0,1 \text{ Ом}$ (сопротивление якоря);

- $L_{я} = 1 \cdot 10^{-4}$ Гн (индуктивность якоря);
- $M_{н} = 4,5$ Н·м (номинальный момент);
- $D = 80$ (добротность) [4, 14].

2.5 Расчет передаточного числа редуктора

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

$$q = \sqrt{\frac{J_{по}}{J_{рд}}} = \sqrt{\frac{0,08}{1,2 \cdot 10^{-4}}} = 8,17. \quad (2.27)$$

Значение электромагнитного момента двигателя, обеспечивающего поворот рабочего органа на заданный угол φ_0 за время t_0 определяется выражениями:

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{\varphi_0 \cdot q}{t_0^2} \cdot \left(J_{рд} + \frac{J_{по}}{q^2 \cdot \eta} \right), \quad (2.28)$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{0,4 \cdot 8,17}{0,1^2} \cdot \left(1,2 \cdot 10^{-4} + \frac{0,08}{8,17^2 \cdot 0,9} \right) = 1,24 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M = B + \sqrt{B^2 + \frac{M_{по}^2}{q^2 \cdot \eta^2}}, \quad (2.29)$$

$$M = 1,24 + \sqrt{1,24^2 + \frac{42,2^2}{8,17^2 \cdot 0,9^2}} = 7,12 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Относительное значение статического момента, приведенного к валу двигателя:

$$\mu = \frac{M_{по}}{q \cdot \eta \cdot M} = \frac{42,2}{8,17 \cdot 0,9 \cdot 7,12} = 0,807. \quad (2.30)$$

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

$$A = \sqrt{J_{\text{по}} + \frac{M_{\text{по}} \cdot t^2 \cdot \mu}{4 \cdot \varphi_0 \cdot \eta}}, \quad (2.31)$$

$$A = \sqrt{0,08^2 + \frac{42,2^2 \cdot 0,1^2 \cdot 0,807}{4 \cdot 0,4 \cdot 0,9}} = 0,563 \text{ кг}^{0,5} \cdot \text{м}.$$

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

$$q = \frac{A}{\sqrt{J_{\text{рд}}}} = \frac{0,429}{\sqrt{1,2 \cdot 10^{-4}}} = 12,4. \quad (2.32)$$

Выбираем $q = 12,5$, тогда:

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{\varphi_0 \cdot q}{t_0^2} \cdot \left(J_{\text{рд}} + \frac{J_{\text{по}}}{q^2 \cdot \eta} \right), \quad (2.33)$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{0,4 \cdot 12,5}{0,1^2} \cdot \left(1,2 \cdot 10^{-4} + \frac{0,08}{12,5^2 \cdot 0,9} \right) = 1,77 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M = B + \sqrt{B^2 + \frac{M_{\text{по}}^2}{q^2 \cdot \eta^2}}, \quad (2.34)$$

$$M = 1,77 + \sqrt{1,77^2 + \frac{42,2^2}{12,5^2 \cdot 0,9^2}} = 5,92 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Относительное значение статического момента, приведенного к валу двигателя:

$$\mu = \frac{M_{\text{по}}}{q \cdot \eta \cdot M} = \frac{42,2}{12,5 \cdot 0,9 \cdot 5,92} = 0,634. \quad (2.35)$$

Оптимальное значение передаточного отношения редуктора:

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

$$A = \sqrt{J_{po} + \frac{M_{po} \cdot t^2 \cdot \mu}{4 \cdot \varphi_0 \cdot \eta}}, \quad (2.36)$$

$$A = \sqrt{0,08^2 + \frac{42,2^2 \cdot 0,1^2 \cdot 0,634}{0,4 \cdot 0,9 \cdot 4}} = 0,516 \text{ кг}^{0,5} \cdot \text{м}.$$

Вычислим добротность двигателя:

$$C = 2 \cdot \frac{\varphi_0 \cdot (A^2 + J_{po}^2)}{t^2 \cdot A}, \quad (2.37)$$

$$C = 2 \cdot \frac{0,4 \cdot (0,516^2 + 0,08^2)}{0,1^2 \cdot 0,516} = 34,2 \frac{\text{Н}}{\text{кг}^{0,5}},$$

$$D = C + \sqrt{C^2 + \frac{M_{po}^2}{A^2 \cdot \eta^2}}, \quad (2.38)$$

$$D = 36,9 + \sqrt{36,9^2 + \frac{42,2^2}{0,516^2 \cdot 0,9^2}} = 115 \frac{\text{Н}}{\text{кг}^{0,5}}.$$

Тогда мощность двигателя:

$$P = 2 \cdot D \cdot A \cdot \frac{\varphi_0}{t} = 2 \cdot 122 \cdot 0,516 \cdot \frac{0,4}{0,1} = 379 \text{ Вт}. \quad (2.39)$$

Проведем моделирование в программе JigreIn (см. рисунок 2.3).

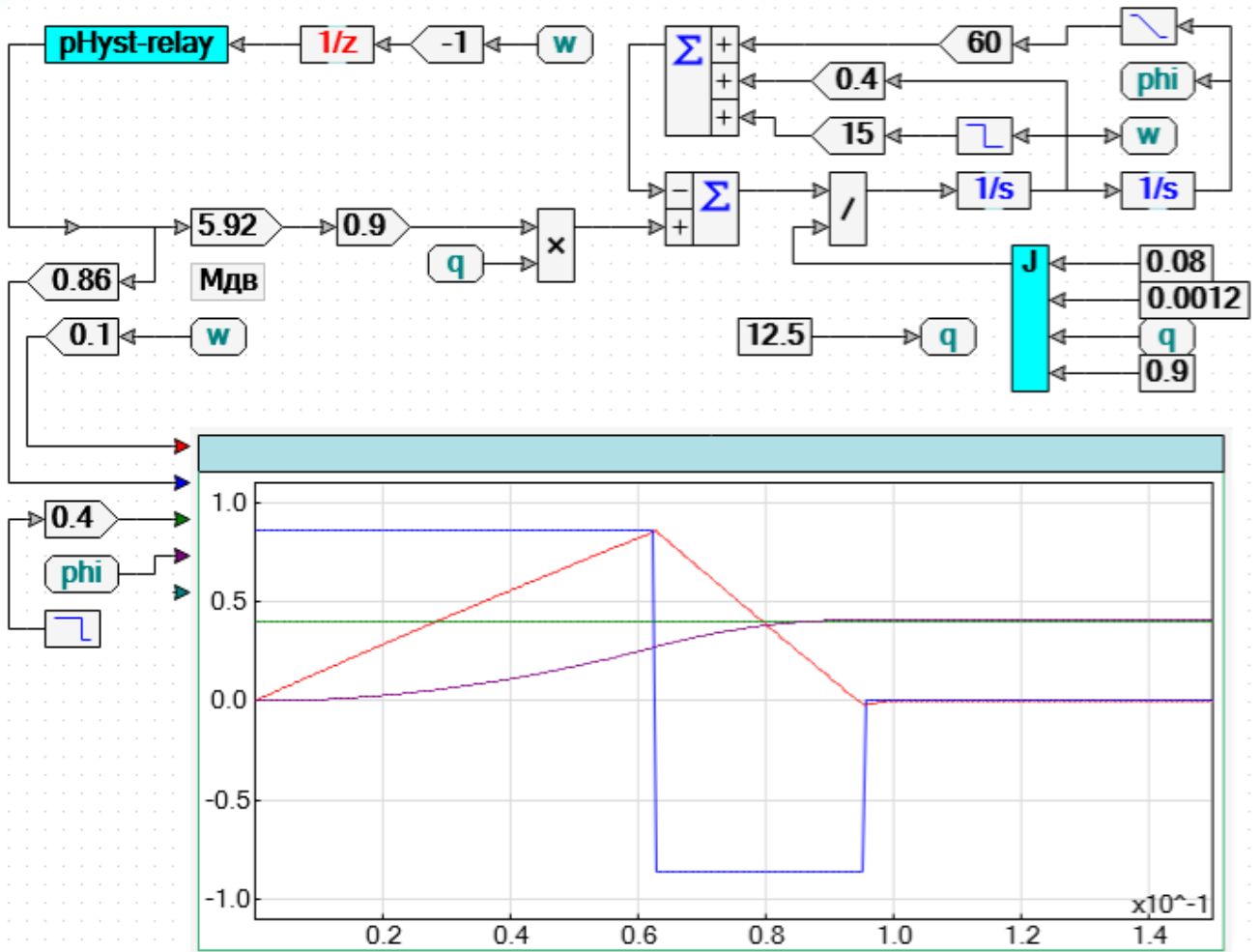


Рисунок 2.3 – Выбор оптимального редуктора по критерию быстродействия

Справа расположена модель двигателя и нагрузки, 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 всех параметров привода. На ней видно, что при расчетных значениях привод обрабатывает заданное перемещение и укладывается в промежуток времени, равный 0,1 с [4, 14, 18].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3 РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ КАЖДОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1 Принцип подчиненного регулирования

В процессе управления приводом регулируемая координата должна наилучшим образом воспроизводить изменения предписанного значения. Однако при этом часто оказывается необходимым ограничить пределы изменения одной или нескольких промежуточных координат (например, ток двигателя или его скорость при отработке углового перемещения). С этой целью одноконтурная система дополняется обратными связями по промежуточным координатам, с помощью которых реализуются различные варианты схем их ограничения. Среди них наибольшее распространение получили системы, построенные по принципу подчиненного регулирования (см. рисунок 3.1).

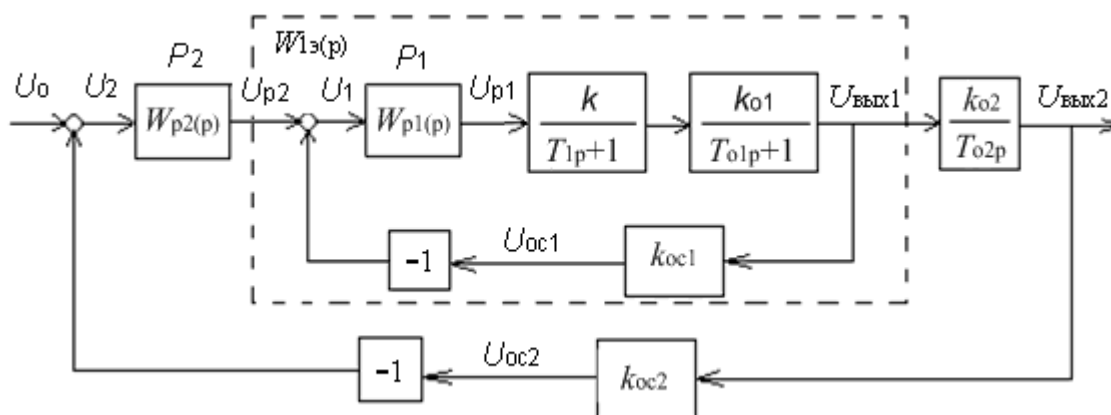


Рисунок 3.1 – Структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования

В системе предусмотрено два контура регулирования со своими регуляторами P_1 и P_2 , причем выходное напряжение регулятора внешнего контура u_{p2} является задающим напряжением для регулятора внутреннего контура. Выходное напряжение регулятора P_2 ограничено предельным значением $u_{p2огр}$. Поскольку выходное напряжение внутреннего

контура $u_{\text{вых1}}$ определяется его задающим значением, т.е. выходным напряжением регулятора P_2 , оно не может превышать $u_{\text{p2огр}}$.

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

$$W_{\text{ж.замк}}(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{u_0(p)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p + 1}. \quad (3.1)$$

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

$$W_{\text{ж.разомк}}(p) = \frac{W_{\text{ж.замк}}(p)}{1 - W_{\text{ж.замк}}(p)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1)}. \quad (3.2)$$

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

Передаточную функцию

$$W_{\text{к2}}(p) = W_{1э}(p) \frac{k_{p2}}{T_{o2} \cdot p} \cdot k_{oc2}. \quad (3.3)$$

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

изложенным выше методом понижения порядка системы можно заменить апериодическим звеном с передаточной функцией:

$$W_{1э}(p) \approx \frac{1/k_{oc}}{T_{1э} \cdot p + 1} \quad (3.4)$$

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

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

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

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

Вместе с тем мы показали, что даже при отсутствии во внешнем контуре других звеньев с малыми постоянными времени, кроме внутреннего контура, его малая постоянная времени будет, по крайней мере, вдвое больше постоянной

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		48

времени внутреннего контура. Это значительно ухудшает быстродействие системы при увеличении числа контуров. Поэтому системы подчиненного регулирования редко строятся с числом контуров более трех [2, 4].

3.2 Настройка контура тока

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

Настроим контур тока на оптимум по модулю. Для этого составим передаточную функцию разомкнутого контура (см. рисунок 3.2):

$$W_{\text{разомк}}(p) = W_p(p) \cdot W_H(p), \quad (3.5)$$

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

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

Подставим выражения и получим:

$$W_{\text{разомк}}(p) = W_p(p) \cdot \frac{k_{\text{пн}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{я}}}{(T_{\text{ср}} \cdot p + 1)(T_{\text{я}} \cdot p + 1)}, \quad (3.6)$$

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

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

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

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

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

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

$$k_{\text{я}} = \frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{0,1} = 10, \quad (3.7)$$

$$T_{\text{ср}} = 0,636 \cdot dT = 0,636 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 3,18 \cdot 10^{-5} \text{ (с)}, \quad (3.8)$$

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		49

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{10^{-4}}{0,1} = 10^{-3}(\text{с}), \quad (3.9)$$

где dT – период дискретизации.

На рисунке 10 датчику тока присвоен коэффициент усиления, равный 1. Коэффициент усиления реального датчика обычно не равен единице, но его коэффициентом усиления решено пренебречь, т.к. это упрощает расчет. Этот коэффициент можно учесть уже внутри микроконтроллера, на который будут подаваться сигналы с датчиков.

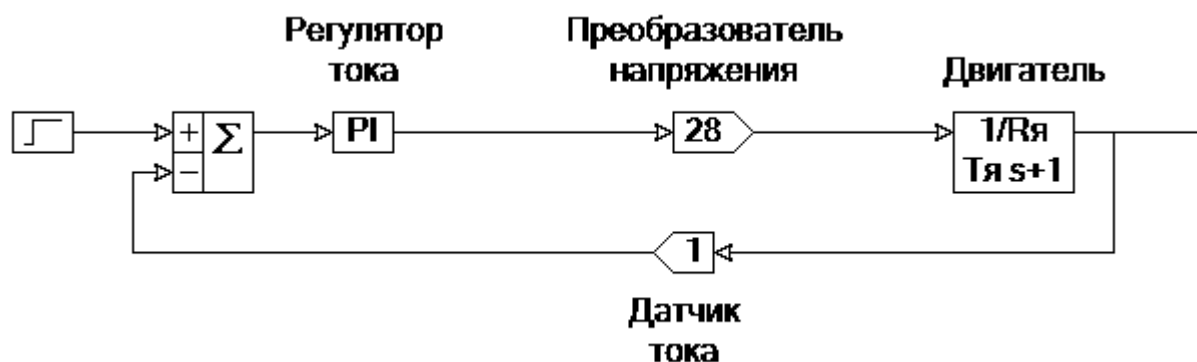


Рисунок 3.2 – Контур регулирования тока

Передаточная функция разомкнутого органа (3.6) должна соответствовать формуле (3.2). Приравняем эти формулы и найдем передаточную функцию регулятора, с помощью которого можно будет скомпенсировать влияние электромагнитной постоянной времени якоря и настроить систему на оптимум по модулю:

$$W_p(p) = \frac{1}{k_{\text{пн}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{я}}} \cdot \frac{T_{\text{я}} \cdot p + 1}{2 \cdot T_{\text{ср}} \cdot p}. \quad (3.10)$$

Или, если представить в виде ПИ-регулятора:

$$W_{\text{рТ}}(p) = k_{\text{рТ}} \cdot \frac{T_{\text{рТ}} \cdot p + 1}{T_{\text{рТ}} \cdot p}, \quad (3.11)$$

где $k_{\text{рТ}}$, $T_{\text{рТ}}$ – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора тока соответственно [2, 11, 13].

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

$$T_{\text{рТ}} = T_{\text{я}} = 10^{-3} \text{ (с)}, \quad (3.12)$$

$$k_{\text{рТ}} = \frac{T_{\text{рТ}}}{2 \cdot T_{\text{ср}} \cdot k_{\text{пн}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{я}}} = \frac{10^{-3}}{2 \cdot 3,18 \cdot 10^{-5} \cdot 28 \cdot 10 \cdot 1} = 0,0562. \quad (3.13)$$

3.3 Настройка контура скорости

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

$$W_{\text{р}}(p) = \frac{2 \cdot T_{\text{ср}}}{T_{\text{я}}} \cdot k_{\text{воз}} \cdot u_{\text{воз}}, \quad (3.14)$$

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

Для того, чтобы свести эту ошибку к нулю, снова можно использовать ПИ-регулятор (см. рисунок 3.3).

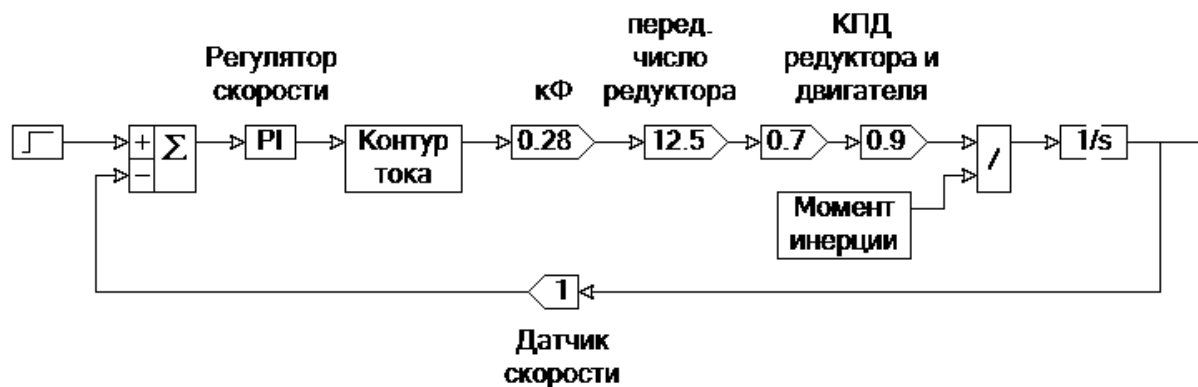


Рисунок 3.3 – Контур регулирования скорости

Настройка на симметричный оптимум подразумевает, что частотная характеристика разомкнутого контура скорости будет иметь изломы, симметричные относительно частоты среза, причем расстояние между частотой среза и изломом должен быть равен одной октаве (см. рисунок 3.4).

Как видно на рисунке, с помощью ПИ-регулятора мы можем задать частоту первого излома и частоту среза. Частоту правого излома задает частота среза контура тока. Так как расстояние между изломами должно быть равно 2 октавам, то частота левого излома будет равна [5, 8, 10, 13]:

$$T_{pc} = 4 \cdot T_{ср.т} = 4 \cdot 6,36 \cdot 10^{-5} = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ (с)}, \quad (3.15)$$

$$\omega_{pc} = \frac{1}{T_{pc}} = \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-4}} = 3,93 \cdot 10^3 \text{ (Гц)}. \quad (3.16)$$



Рисунок 3.4 – АЧХ звеньев контура скорости

Частота среза соответственно равна:

$$w_{ср.ск} = 2 \cdot w_{рс} = 2 \cdot 3,93 \cdot 10^3 = 7,86 \cdot 10^3 \text{ (Гц)}. \quad (3.17)$$

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

$$K_{\text{рск}} = \frac{1}{dK}. \quad (3.18)$$

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

$$dK = \frac{K_{\text{о.ск}}}{w_{\text{ср.ск}}}, \quad (3.19)$$

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

$$K_{\text{о.ск}} = \frac{k\Phi \cdot q \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot k_{\text{дс}}}{J}, \quad (3.20)$$

где $k\Phi$ – конструктивный коэффициент двигателя;

q – передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора;

$\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя;

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

J – момент инерции вала двигателя и рабочего органа:

$$J = J_{\text{ро}} + J_{\text{дв}} \cdot q^2 = 0,08 + 0,0012 \cdot 12,5^2 = 0,267, \quad (3.21)$$

где $J_{\text{ро}}, J_{\text{дв}}$ – момент инерции рабочего органа и двигателя соответственно.

$$K_{\text{о.ск}} = \frac{0,28 \cdot 12,5 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 1}{0,268} = 11,8.$$

Вычислим коэффициент усиления ПИ-регулятора контура скорости:

$$K_{\text{рск}} = \frac{1}{dK} = \frac{w_{\text{ср.ск}}}{K_{\text{о.ск}}} = \frac{1}{T_{\text{ср.ск}} \cdot K_{\text{о.ск}}} = \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-4} \cdot 11,8} = 668.$$

На этом расчет контура регулирования скорости окончен [2].

					ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.4 Настройка контура положения

Как и в предыдущем случае, нам нужно скомпенсировать влияние интегратора. В данном случае он реализует вычисление положения рабочего органа из его скорости перемещения (см. рисунок 3.5). Отличие состоит в том, что в цепи контура положения уже нет никаких дополнительных коэффициентов, которые нужно учитывать. Соответственно, коэффициент усиления регулятора положения равен (см. рисунок 3.6):

$$K_{кп} = \frac{1}{K_{и}} = w_{ср.пол}. \quad (3.22)$$

Частоту среза контура положения также возьмем на октаву меньше (настройка на оптимум по модулю) [5, 8, 13]:

$$w_{ср.пол} = 0.5 \cdot w_{ср.ск} = 0,5 \cdot 7,86 \cdot 10^3 = 3,93 \cdot 10^3 \text{ (Гц)}, \quad (3.23)$$

$$K_{кп} = 3,93 \cdot 10^3.$$

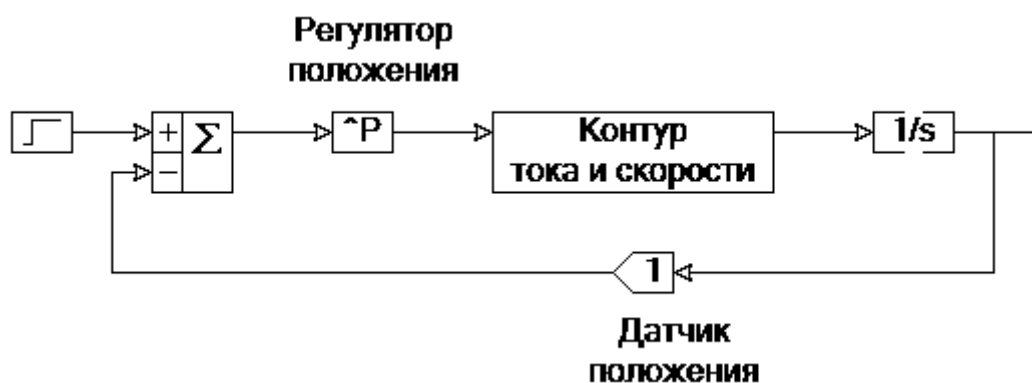
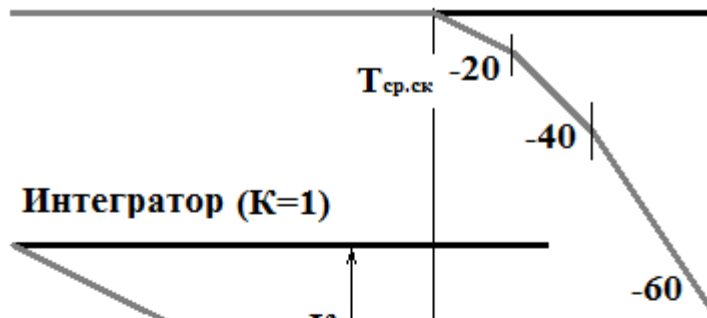
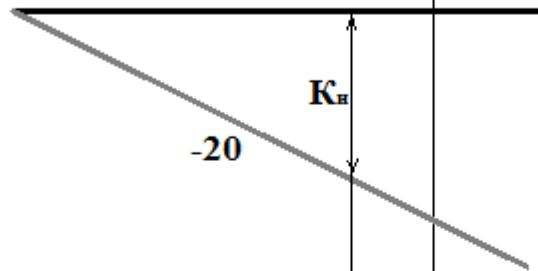


Рисунок 3.5 – Контур регулирования положения

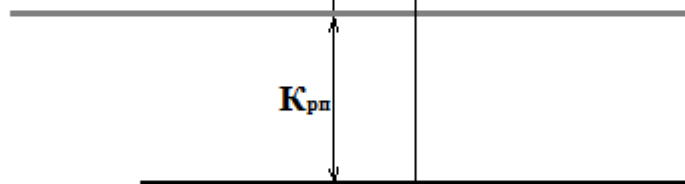
Замкнутый контур скорости



Интегратор (K=1)



Параболический регулятор



Разомкнутый контур положения



Рисунок 3.6 – АЧХ звеньев контура положения

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

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И СНЯТИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Смоделированная система подчиненного регулирования представлена на рисунке 4.1.

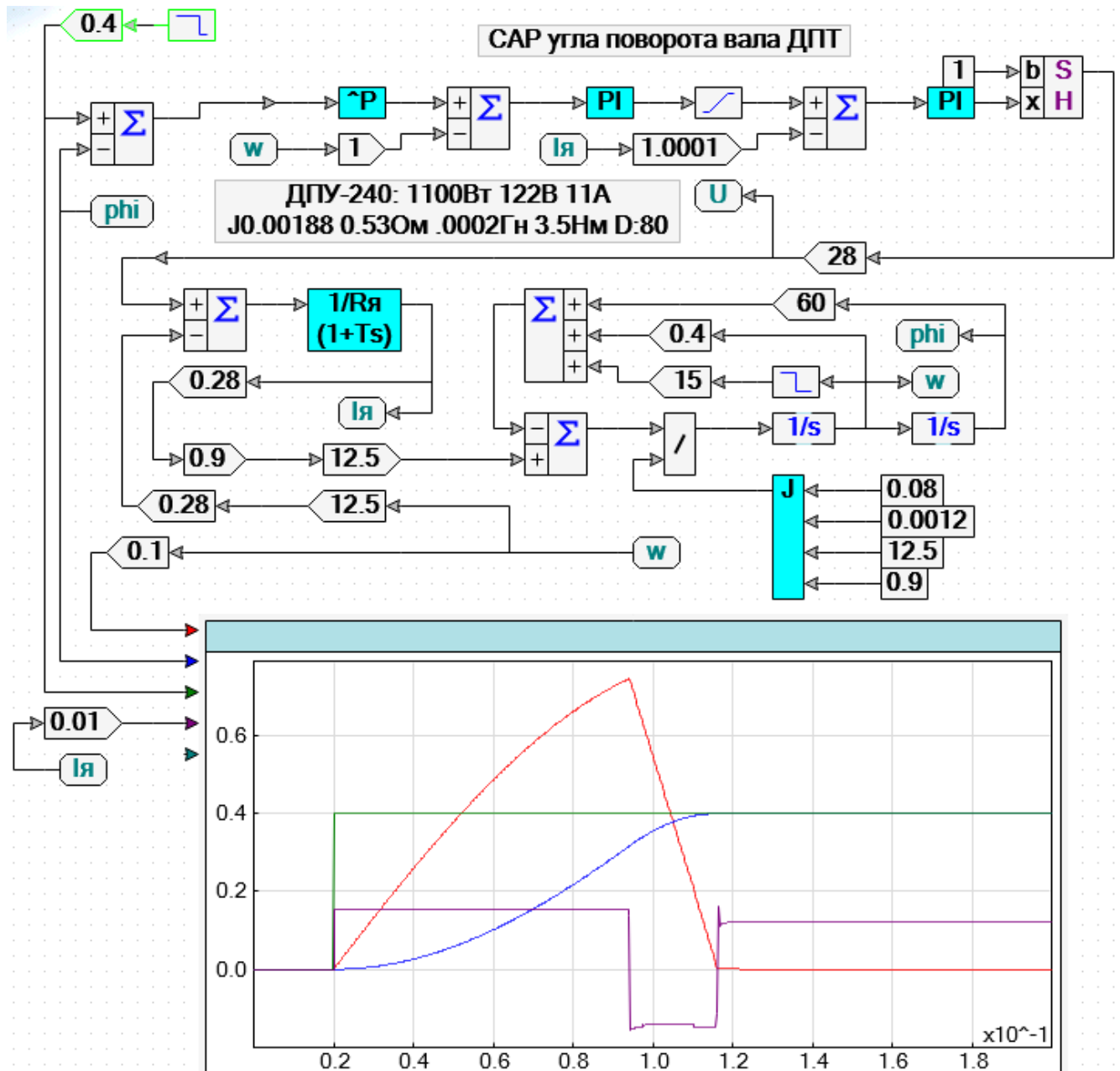


Рисунок 4.1 – Модель подчиненного регулирования в Jigrein

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

4.1 Частотные характеристики звеньев контура тока

Далее будут сняты частотные характеристики следующих звеньев: обмотки якоря (см. рисунок 4.2), ПИ-регулятора контура тока (см. рисунок 4.3), разомкнутого и замкнутого контура тока (см. рисунки 4.4 и 4.5).

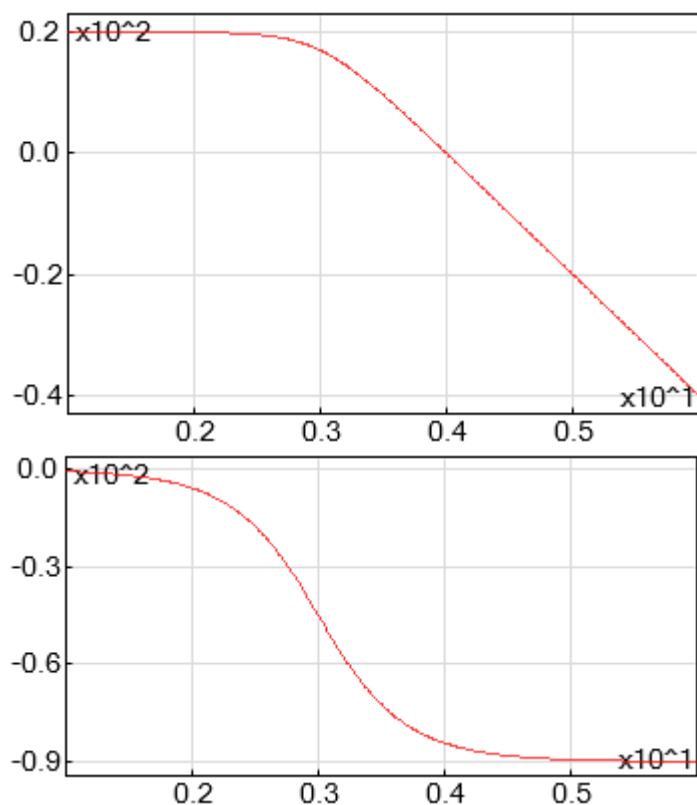


Рисунок 4.2 – ЛАЧХ и ЛФЧХ обмотки якоря

$$k_{я.л.} = 20 \log k_{я} = 20 \log(10) = 20, \quad (4.1)$$

$$w_{я.л.} = \log \frac{1}{T_{я}} = \log \frac{1}{0,001} = 3. \quad (4.2)$$

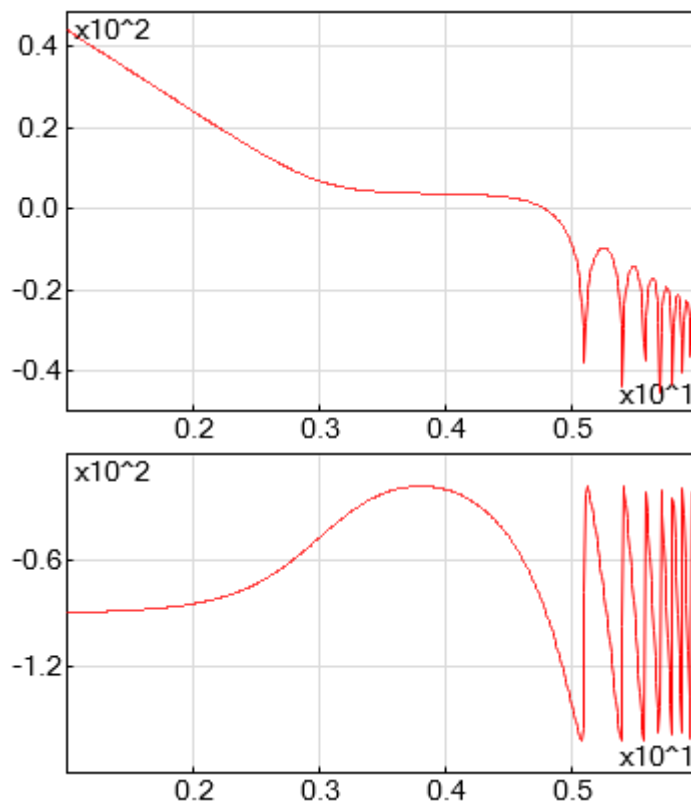


Рисунок 4.3 – ЛАЧХ и ЛФЧХ ПИ-регулятора тока и преобразователя напряжения

$$k_{\text{кт.л.}} = 20 \log(k_{\text{кт}} \cdot k_{\text{пн}}) = 20 \log(0,0562 \cdot 28) = 3,93, \quad (4.3)$$

$$w_{\text{кт.л.}} = w_{\text{я.л.}} = 3. \quad (4.4)$$

На рисунке у ПИ-регулятора тока виден «хвост», который объясняется дискретными свойствами ЦВМ. При расчетах влияние ЦВМ описывается апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени $T_{\text{ср}}$.

$$w_{\text{ср.л.}} = \log \frac{1}{T_{\text{ср}}} = \log \frac{1}{3,18 \cdot 10^{-5}} = 4,5. \quad (4.5)$$

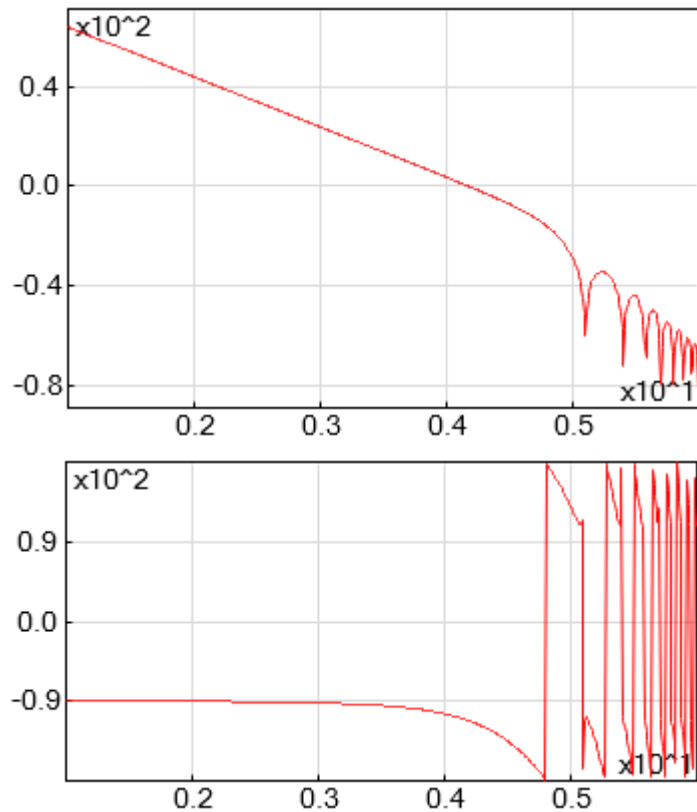


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура тока

Как видно на графиках, ПИ-регулятор компенсирует отставание по фазе обмотки якоря.

Частота единичного усиления:

$$\omega_{\text{ср.т.л.}} = \log \frac{1}{T_{\text{ср.т}}} = \log \frac{1}{6,36 \cdot 10^{-5}} = 4,2. \quad (4.6)$$

Как видно на ЛФЧХ, при данной частоте запас по фазе равен 63° , что соответствует настройке на оптимум по модулю.

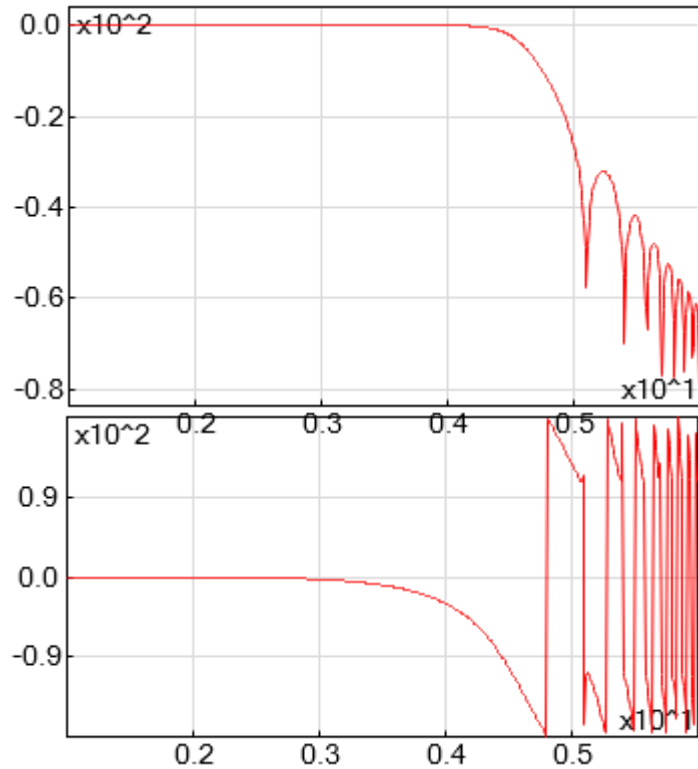


Рисунок 4.5 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура тока

4.2 Настройка контура скорости

Здесь будут представлены частотные характеристики объекта (с учетом инерционности вала, кФ, а также КПД и передаточного числа редуктора, см. рисунок 4.6), ПИ-регулятора контура скорости (см. рисунок 4.7), разомкнутого и замкнутого контура скорости (см. рисунки 4.8 и 4.9).

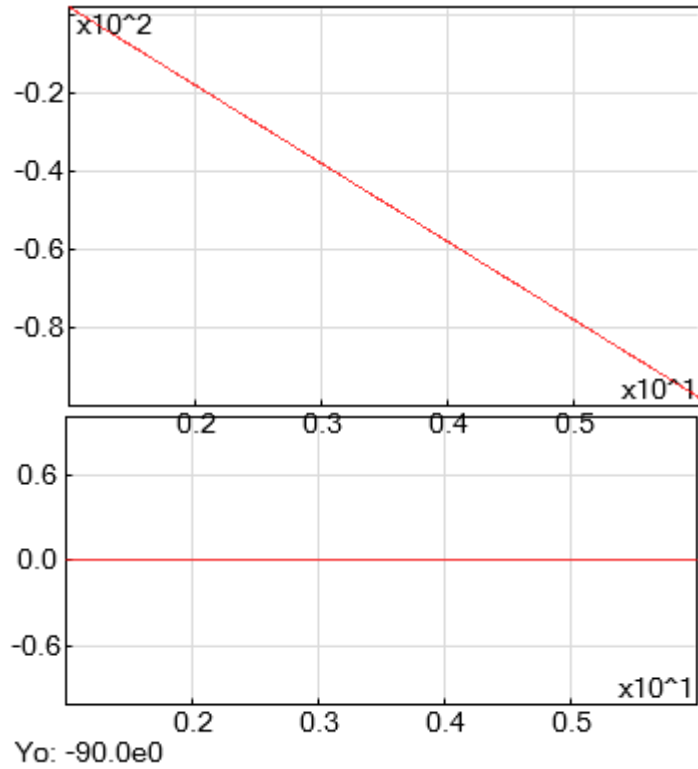


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ и ЛФЧХ объекта

Результирующий коэффициент усиления:

$$K_{o.ck.l.} = \log K_{o.ck.} = \log 11,8 = 1,07. \quad (4.7)$$

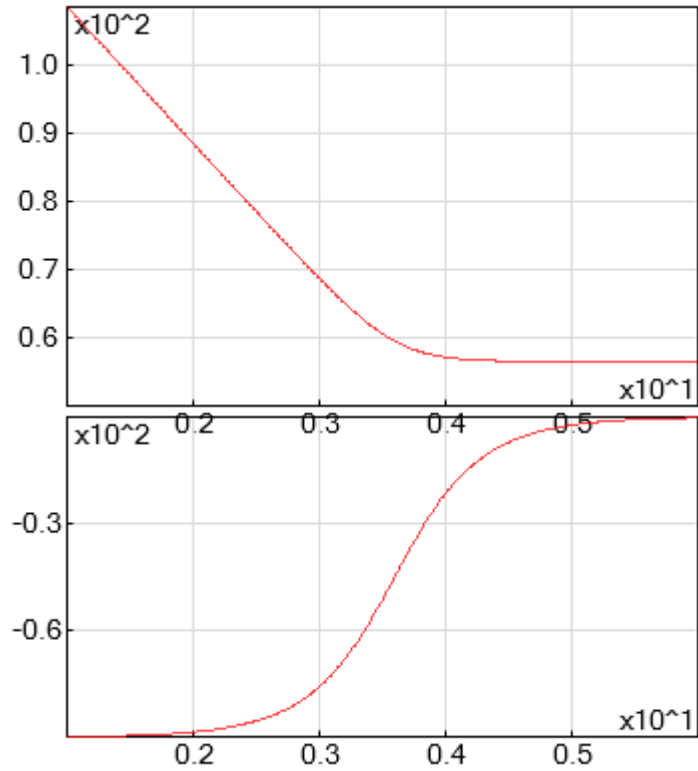


Рисунок 4.7 – ЛАЧХ и ЛФЧХ ПИ-регулятора контура скорости

Параметры ПИ-регулятора в логарифмических величинах:

$$k_{\text{кск.л.}} = 20 \log(k_{\text{кск}}) = 20 \log(668) = 56,5, \quad (4.8)$$

$$w_{\text{кск.л.}} = \log w_{\text{кск.}} = \log \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-4}} = 3,59. \quad (4.9)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

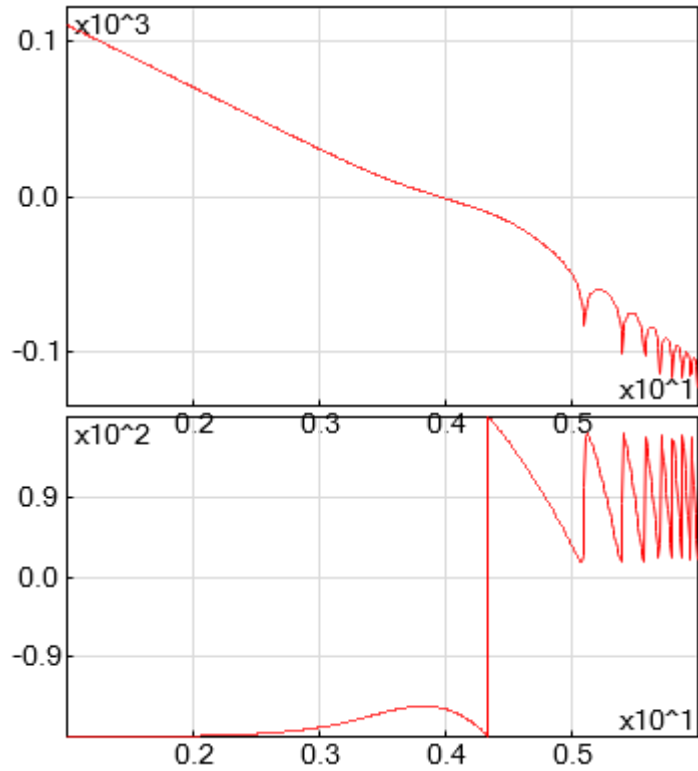


Рисунок 4.8 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура скорости

Частота единичного усиления контура скорости:

$$w_{\text{ср.ск.л.}} = \log \frac{1}{w_{\text{ср.ск.}}} = \log \frac{1}{1,27 \cdot 10^{-4}} = 3,9. \quad (4.10)$$

При данной частоте запас по фазе составляет 37° , что соответствует требованиям устойчивости системы (контур скорости настроен на симметричный оптимум).

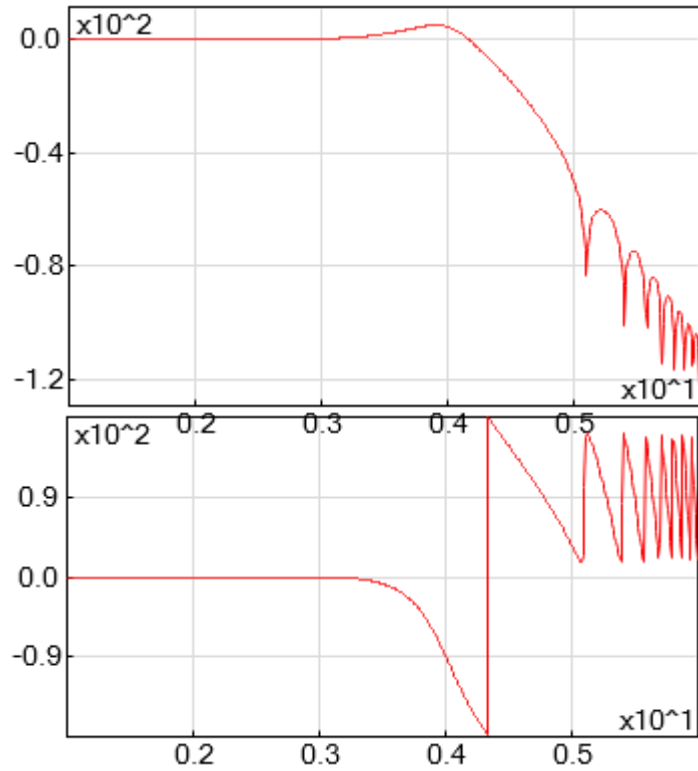


Рисунок 4.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура скорости

4.3 Настройка контура положения

Для настройки контура положения будем использовать Р-регулятор (см. рисунок 4.10):

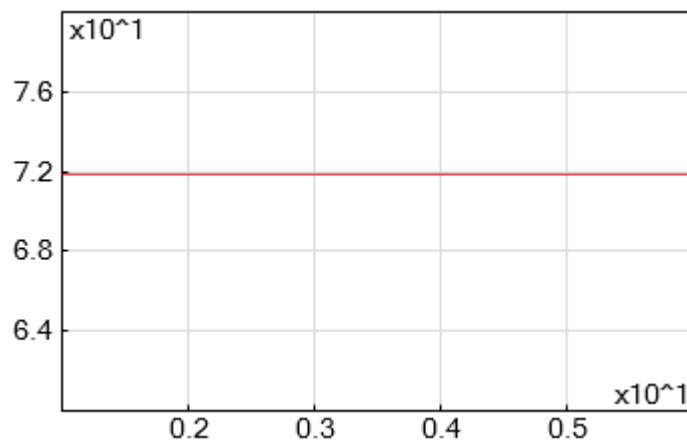


Рисунок 4.10 – ЛАЧХ замкнутого контура скорости

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Коэффициент усиления параболического регулятора:

$$K_{кп.л} = 20 \cdot \log K_{кп} = 20 \cdot \log 3,93 \cdot 10^3 = 71,9. \quad (4.11)$$

Разомкнутый контур положения (см. рисунок 4.11):

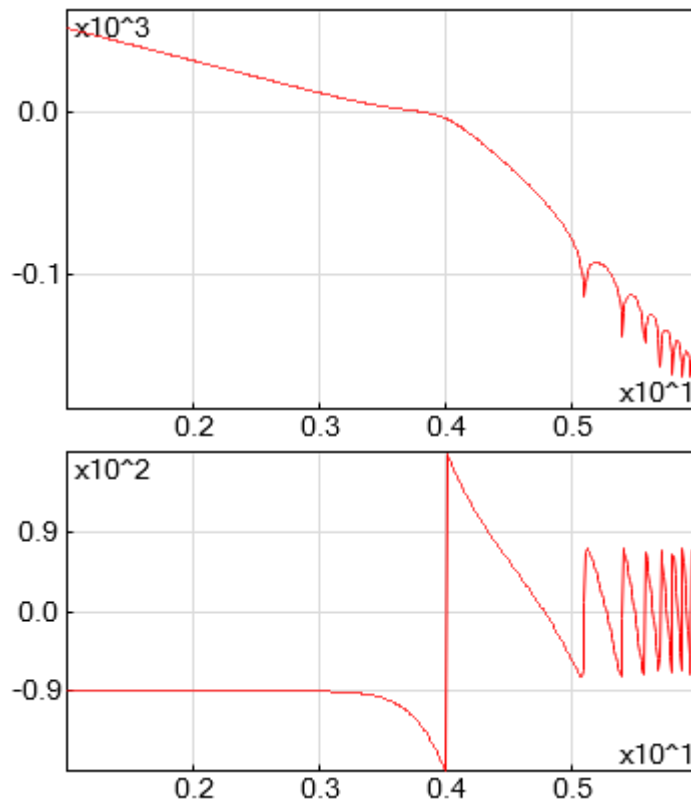


Рисунок 4.11 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура положения

Частота единичного усиления контура положения:

$$\omega_{ср.п.л.} = \log \frac{1}{T_{ср.п.}} = \log \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-4}} = 3,59. \quad (4.12)$$

Замкнутый контур положения (см. рисунок 4.12):

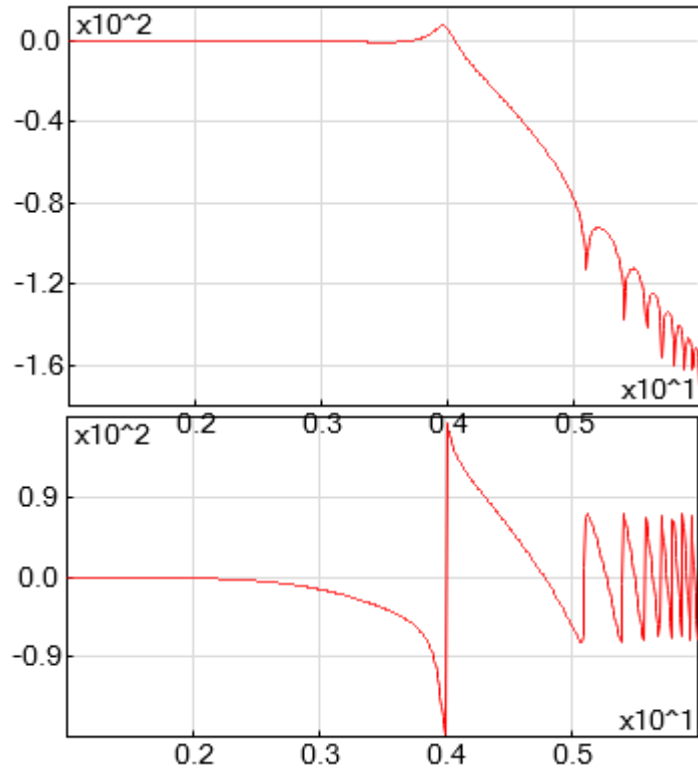


Рисунок 4.12 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура положения

Значения, рассчитанные в предыдущей главе, сходятся с частотными характеристиками, снятыми с модели. Внешний вид характеристик говорит о том, что регуляторы настроены верно [7, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проектирования была настроена система подчиненного регулирования для рулевого управления сопла ракеты, а именно:

- выбран двигатель для электропривода сопла ракеты;
- рассчитано передаточное число редуктора для обеспечения максимального быстродействия системы;
- настроена трехконтурная система подчиненного регулирования;
- произведено моделирование системы и подтверждена правильность расчетов.

Разработанная система управления соответствует требованиям быстродействия и устойчивости.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		68

Удуг // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – №7. – С. 120-125.

12) Ленденева, Н.Ф. Механика. Детали машин: учеб. пособие для курсантов и студентов ФБФО. / Н.Ф. Ленденева. – Ульяновск: Изд-во УВАУ ГА, 2005. – 127 с.

13) Математическое описание и стандартные настройки систем автоматического управления электроприводами. – http://model.exponenta.ru/epivod/glv_070.htm.

14) Механика электропривода – http://model.exponenta.ru/epivod/glv_010.htm.

15) Механические передачи – <http://www.mehanicakvs.narod.ru/razdel4/r42.html>.

16) Механика привода: статический и динамический режимы. Основное уравнение движения. – <http://msd.com.ua/avtomatizirovannyj-elektroprivod-v-prokatnom-proizvodstve/mexanika-privoda-staticeskij-i-dinamicheskij-rezhimy-osnovnoe-uravnenie-dvizheniya/>.

17) Министерство образования и науки российской федерации. Космическое приборостроения/Министерство образования и науки российской федерации – Томск: Изд-во ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014. – 375 с

18) Моделирующая программа Jigrein – <http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/contents.htm>.

19) Приведение моментов и моментов инерции. – <http://bourabai.ru/toe/electro04.htm>.

20) Приведение моментов к одной оси вращения. – https://studme.org/90429/tehnika/privedenie_momentov_odnoy_vrascheniya.

21) Силы и моменты, действующие в системе электропривода – https://studopedia.ru/11_29613_sili-i-momenti-deystvuyushchie-v-sisteme-elektroprivoda.html.

22) Шарико-винтовые передачи – <http://www.lmotion.ru/screwball.shtml>.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						70
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

23) Шумилов, И.С. Системы управления рулями самолётов: учеб. пособие.
/ И. С. Шумилов. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 469 с.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02 2018 163.1 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		71