

Оглавление

Введение	13
1. Обзор литературы	15
2. Объект и методы исследования	21
3. Выбор и обоснование способа обезвешивания крыльев солнечных батарей. Разработка математической модели системы стабилизации натяжения троса	23
3.1. Классы систем обезвешивания	23
3.2. Структурная схема системы стабилизации	25
3.5.1. Электропривод	25
3.5.2. Датчик силы	30
3.5.3. Контроллер	32
3.5.4. Блок питания	34
3.3. Математическое описание непрерывных линейных звеньев	35
3.5.1. Электропривод	35
3.5.2. Датчик силы	36
3.4. Нелинейные характеристики звеньев	36
3.5.1. Сухое трение редуктора	36
3.5.2. Люфт редуктора	37
3.5. Математическое описание контроллера	39
3.5.1. Аналогово-цифровой преобразователь	39
3.5.2. Цифро-аналоговый преобразователь	40
3.5.3. Цифровая вычислительная машина	41
3.6. Методы синтеза цифрового регулятора	41
4. Преобразование ОСС к конечному виду	45
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	49
6. Социальная ответственность	75
Заключение	90
Список публикаций	92
Список использованных источников	93
Приложение А. Описание интерфейса программного пакета Matlab	95

Введение

Целью данной работы является создание математической модели автоматической системы стабилизации натяжения тросов обезвешивания крыльев солнечных батарей космических аппаратов.

В процессе создания (КА) важным этапом является этап наземных испытаний. Во время испытаний (КТС) космического базирования условия, созданные в цехах и лабораториях, кардинально отличаются от условий открытого космоса. Основными параметрами, отличающими эти две среды, являются:

- температура (температура в космосе может резко меняться в пределах от -120 – 150 °С);
- отсутствие силы тяжести (приводит к отсутствию деформаций конструкции и дополнительных трений в шарнирах).

Для устранения влияния второго фактора необходимо устройство, которое создавало бы силы, равные по модулю весу испытуемой конструкции и противоположные им по направлению. С этой целью создаются стенды обезвешивания для наземных испытаний механических устройств.

При проведении испытаний крупногабаритных трансформируемых систем применяется полунатурный эксперимент: крыло солнечной батареи или другое устройство, впоследствии устанавливаемое на КА, закрепляется на массогабаритный макет КА и приводится приводами из транспортируемого состояния в рабочее, т. е. раскрывается. Каждое звено конструкции (например, секция КБС) соединяется при помощи вертикально поддерживаемого троса к приводу, создающему обезвешивающую силу. В то же время в моделирование работы стенда при проведении испытаний может быть полезным с точки зрения возможности прогнозирования результатов работы стенда и хода раскрытия КСБ. С этой целью и проводится работа по построению математической модели стенда.

Объектом исследования является система стабилизации натяжения тросов обезвешивания, устанавливаемая на каретку, расположенную на

горизонтальных направляющих над обезвешиваемым изделием. Система состоит из следующих структурных составляющих: привод, датчик силы, АЦП, контроллер. Поэтому основной задачей будет являться построение математической модели каждой из этих составляющих и их последующее объединение.

Полученную в ходе выполнения математическую модель предполагается использовать на предприятии АО "Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева" в отделах, которые занимаются проведением испытаний КТС, в частности КБС. Данную модель можно дополнять и уточнять при помощи данных, полученных в ходе полунатурных экспериментов.

1. Обзор литературы

Обзор литературы выполнен по двум направлениям: обзор систем обезвешивания и методов моделирования.

Системы обезвешивания

Основным источником информации по системам обезвешивания и имитации невесомости являются патенты.

Патенты ФГУП ПО "Полет" (г. Омск) (RU2252159, RU 2299840, RU 2376217, RU 2483991), полученные предприятием в 2003–2007 гг., связаны с созданием стендов для испытания горизонтально перемещающейся многозвенной механической системы космического аппарата, в частности, системы раскрытия панелей солнечных батарей. Хронологически, конструкции стенда начинаются с использования секционной консольной штанги для подвеса элементов БС, однако затем делаются попытки расширить сферу применения стендов за счет введения дополнительных опор штанги или ввести роликовые подвесы на потолочных балках. В качестве общих черт предложенных конструкций можно отметить, что:

- кинематика штанги повторяет кинематику панелей,
- точки подвеса находятся на осях разворота конструкции,
- для обезвешивания используются регулируемые пружины (в случае рычажной секционной подвески) или противовесы при переходе к роликовой подвеске,
- стенд реализуется с пассивной системой обезвешивания, т.е. разворот элементов штанги происходит за счет собственных механизмов разворота испытываемой конструкции,
- разворот только горизонтальный.

В патенте RU 2376217 изменен принцип подвеса. От секционной штанги предложено перейти к натянутому тросу, по которому скользят роликовые подвесы. Соответственно меняется принцип подвеса элементов. Теперь точка подвеса находится на оси вращения панели.

Существуют, однако, задачи испытаний, которые нельзя решить с помощью подобных стендов с пассивной системой обезвешивания. Можно выделить два фактора – необходимость разворачивания конструкции в трехмерном пространстве и, соответственно, появление вертикального канала; увеличение размеров трансформируемых конструкций.

Анализ патентных и статейных материалов показал, что увеличение размеров конструкций привело к отказу от жестких штанговых поддерживающих конструкций, кинематика которых повторяет кинематику разворачиваемого механизма, и переходу к системе противовесов для решения задачи обезвешивания.

Промежуточным вариантом можно считать отмеченный ранее патент ФГУП ПО "Полет" RU 2376217, в котором с целью расширения возможностей стенда предложено перейти от секционной штанги к натянутому тросу, по которому скользят роликовые подвесы. При этом вся конструкция остается пассивной, а обезвешиваемые элементы конструкции крепятся к роликовым подвесам на пружинах.

Однако возможности такого решения ограничены, и следующим шагом в развитии стендов горизонтального разворачивания стал переход к закреплению обезвешиваемого груза на каретках, передвигающихся по подвесным балкам или полу помещения. Масса кареток уже не позволяла создавать качественные системы с пассивными системами обезвешивания, что сделало необходимым активное управление положением кареток с использованием электроприводов, датчиков положения и микропроцессоров. При этом для обезвешивания стали применять противовесы и петлевые тросовые подвески на каретках. Такие варианты стендов следует отнести к группе с активно-пассивными системами обезвешивания, так как в них горизонтальные перемещения кареток, решающие задачу поддержания вертикальности тросовой подвески относительно точки крепления к изделию, осуществляются с помощью электроприводов, а задача обезвешивания решается в пассивном режиме с использованием

противовесов или пружин. Такие решения длительное время прорабатывались и в НПО прикладной механики имени академика М.Ф. Решетнева и нашли свое отражение, в частности, в авторских свидетельствах SU 304792 и SU 308165.

Очевидным расширением возможностей подобных стендов является использование таких кареток, которые позволяют точке подвеса перемещаться на значительные расстояния в плоскости. Для этого используются две системы направляющих, из которых одна крепится к потолку помещения и несет каретки, на которых закреплена другая система направляющих, ортогональная первой. Это дает возможность точке подвеса двигаться в горизонтальной плоскости при больших амплитудах этих движений.

Переход в стендах для наземных испытаний КСБ к системе кареток сделал возможным введение в испытательные стенды активного управления и вертикальными перемещениями обезвешиваемой конструкции. Задача вертикальных перемещений обезвешиваемого тела в общем случае более сложна, чем задача горизонтального развертывания. В вертикальном канале необходимо скомпенсировать все силы, действующие на объект: силы трения, гравитационные силы, силы инерции присоединённых масс. При выполнении этого условия разворачиваемая конструкция будет двигаться под действием разворачивающих усилий с требуемыми параметрами движения как в невесомости. Дополнительные сложности могут быть связаны с конечной упругостью элементов подвеса.

Наиболее совершенной и перспективной, по крайней мере, по заявленным особенностям, является активная система обезвешивания, предложенная в патенте RU 2433970 от 2006 г. Патентообладатель – ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева.

Заявленное устройство содержит электропривод вертикального перемещения, связанный с обезвешиваемым элементом гибкой связью, проходящей через каретку, с нагрузочной ячейкой, служащей для

определения усилия натяжения гибкой связи, перемещающуюся по направляющей. При этом нагрузочная ячейка связана с электроприводом вертикального перемещения через блок управления, который, в свою очередь, связан с электроприводом горизонтального перемещения через датчик, определяющий вертикальное положение гибкой связи и расположенный на каретке. Блок управления состоит из микроконтроллера и персонального компьютера. Следует отметить, что патент RU2433970 дает лишь структуру системы обезвешивания, не касаясь вопросов управления этой структурой.

1.2. Методы моделирования

Под *моделированием* понимается процесс исследования реальной системы, включающий построение модели, изучение ее свойств и перенос полученных сведений на моделируемую систему.

Общими функциями моделирования являются описание, объяснение и прогнозирование поведения реальной системы.

Типовыми целями моделирования могут быть поиск оптимальных или близких к оптимальным решений, оценка эффективности решений, определение свойств системы (чувствительности к изменению значений характеристик и др.), установление взаимосвязей между характеристиками системы, перенос информации во времени.

Модель – это объект, который имеет сходство в некоторых отношениях с прототипом и служит средством описания и(или) объяснения, и/или прогнозирования поведения прототипа. Важнейшим качеством модели является то, что она дает упрощенный образ, отражающий не все свойства прототипа, а только те, которые существенны для исследования.

Метод, который является основой описанных выше систем, называется *полунатурным*. В таком случае некоторая часть факторов или условий имитируется. Например, при проведении испытаний КБС имитируются условия открытого космоса при помощи специальных технических средств. Для имитации вакуума и температурных режимов

используются вакуумные и тепловые камеры, в которых происходит создание вакуума и температур, близких к температурам при нахождении конструкции на орбите. Для имитации невесомости создаются системы обезвешивания, в которых компенсируется вес конструкции. Также вместо самого КА используется его массогабаритный макет, в котором масса распределена приблизительно также, как и на самом КА.

По такому же принципу с целью моделирования можно проводить испытания самой системы обезвешивания. В таком случае можно заменить испытуемое КБС системой грузов и связей между этими грузами.

Такой метод моделирования даёт очень близкие к реальным условиям результаты, однако он является дорогостоящим, поскольку для создания технических средств имитации условий тратится большое количество времени и материальных ресурсов.

Другим методом является построение математических моделей. *Математическое моделирование* (математическое описание) систем представляет собой процесс формирования из математических символов (атрибутов) математических уравнений, а в ряде случаев и неравенств или других математических образов, отражающих с приемлемой точностью структуры, свойства, характеристики, состояния этих систем, их связи с внешней средой и/или протекающие в них процессы. Уравнения, неравенства или другие математические образы либо их сочетания, позволяющие проводить количественный анализ хотя бы одного из свойств, характеристик системы или её структуры, состояний при взаимодействии с внешней средой или без такового, называют *математической моделью системы*.

Математические модели систем описывают определённые состояния, структуру, свойства, характеристики систем, условия их функционирования и/или протекающие в них процессы. Для каждого типа систем перечень таких состояний, процессов, свойств и характеристик обычно конечен и легко устанавливается уже на первоначальных стадиях

их создания или анализа. Заметим, что вся совокупность интересующих разработчиков или исследователей свойств и характеристик систем состоит из двух групп:

- 1) внутренние свойства и характеристики систем;
- 2) свойства и характеристики систем, проявляющиеся при их взаимодействии с внешней средой (внешние свойства и характеристики систем).

Классифицировать математические модели можно по следующим признакам:

1) **По типу используемых переменных:** модели с переменными целого, вещественного, комплексного и/или логического типа.

2) **По характеру зависимости от времени:** статические и динамические.

3) **По типу вхождения в модель внутренних и выходных переменных:** линейные и нелинейные.

4) **Типу параметров:** стационарные и нестационарные.

5) **По типу входящих в модель производных и интегралов:** системы с сосредоточенными и распределёнными параметрами.

6) **По типу аргументов:** с несмещёнными и смещёнными аргументами.

Тип системы по этой классификации определяет особенности математической модели. Например, смещённые аргументы обычно имеют место в импульсных и цифровых системах.

Используя данную классификацию можно описать как уже существующую модель, так и проектируемую.

2. Объект и методы исследования

Объектом исследования является система автоматической стабилизации натяжения тросов системы обезвешивания. Данная система предназначена для поддержания постоянного значения обезвешивающей силы, которая должна быть, в идеальном случае, точно равна весу испытываемой конструкции. Система работает следующим образом.

Обезвешиваемая конструкция закрепляется при помощи троса к расположенной на каретке шпуле, на которую этот трос наматывается. Шпуля насажена на выходной вал редуктора, который, в свою очередь, соединён с валом электрического двигателя, вместе с которым они создают электропривод. В качестве двигателя был выбран вентильный двигатель. Для управления таким двигателем используется цифровой контроллер, основными функциями которого являются управление коммутаторами фаз вентильного двигателя и хранение сигнала задатчика силы натяжения. Для контроля создаваемой силы в тросовый подвес встраивается тензометрический датчик силы. Этот датчик преобразует механическую деформацию чувствительного элемента в электрическое напряжение.

Поскольку контроллер, осуществляющий управление, является цифровым, то для работы с напряжением последнее переводится из аналоговой формы в цифровой код посредством АЦП. Затем сигнал с АЦП поступает на ЦВМ, функцию которого в контроллере выполняет микропроцессор. Из памяти считывается значение сигнала задатчика, которое сравнивается с полученным с датчика силы значением. При наличии отклонения ЦАП вырабатывает сигнал управления для блока питания, который изменяет напряжение фаз вентильного двигателя таким образом, чтобы момент на выходном валу двигателя корректировался по величине в нужную сторону.

Из выше сказанного можно сделать предположение, что систему можно разбить на две части: непрерывную и дискретную.

Непрерывная часть системы включает в себя электропривод, состоящий из двигателя, редуктора; шпулю и датчик силы.

Дискретная часть системы включает в себя компоненты контроллера: АЦП, ЦВМ и ЦАП.

Помимо описания линейных зависимостей непрерывной части, имеет смысл проработать её и ввести нелинейные характеристики для уточнения математической модели или, наоборот, упростить некоторые нелинейности, если это упрощение не приведёт к сильным искажениям полученных результатов моделирования.

Для построения операторно-структурной схемы системы автоматической стабилизации натяжения троса (САС НТ) используются передаточные функции, которые являются математическим описанием вход-выходных связей каждого из структурных элементов каждого структурного элемента системы.

Для работы с нелинейными характеристиками возможно использование как точных методов (например, фазовых портретов), так и приближительных методов (в частности, гармонической линеаризации).

В результате выполнения выпускной квалификационной работы предполагается создание математической модели цифровой системы в виде операторно-структурной схемы, в которой непрерывная часть модели будет совмещена с дискретной моделью. Данная операторно-структурная схема не будет иметь числовых значений коэффициентов и постоянных времени, поскольку последние определяются отдельно для каждого случая реализации САС.

3. Выбор и обоснование способа обезвешивания крыльев солнечных батарей. Разработка математической модели системы стабилизации натяжения троса

3.1. Классы систем обезвешивания

С точки зрения влияния инерционности элементов стенда обезвешивания и независимости сил от точек их приложения системы обезвешивания можно разделить на три класса: пассивные, активные и комбинированные.

В *пассивных системах* перемещение подвижных элементов стенда производится за счёт сил и/или моментов, которые вырабатывают приводы самой испытуемой конструкции. Для создания компенсирующих сил используются пассивные механические элементы: пружины, противовесы и т. п. Подобные системы в силу того, что к массе испытуемой конструкции прибавляются массы подвижных элементов стенда, а также моменты и силы сопротивления, создаваемые ими, не могут обеспечить высокую точность имитации невесомости в процессе испытаний. Пример такой системы показан на рис. 3.1.

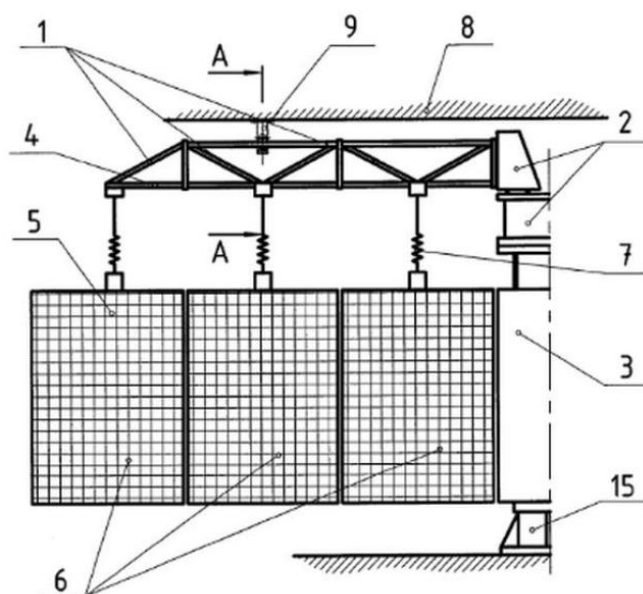


Рисунок 3.1 – Внешний вид варианта исполнения пассивной системы обезвешивания

В активных системах и перемещение элементов стенда, и силы обезвешивания обеспечиваются при помощи внешних сил и моментов, создаваемых приводами, установленными в стенд. В идеальном случае элементы стенда не создают дополнительных моментов и сил, действующих на испытываемую конструкцию. В этой связи такого рода стенды в перспективе могут обеспечить более высокую точность имитации невесомости. Пример такой системы показан на рис. 3.2.

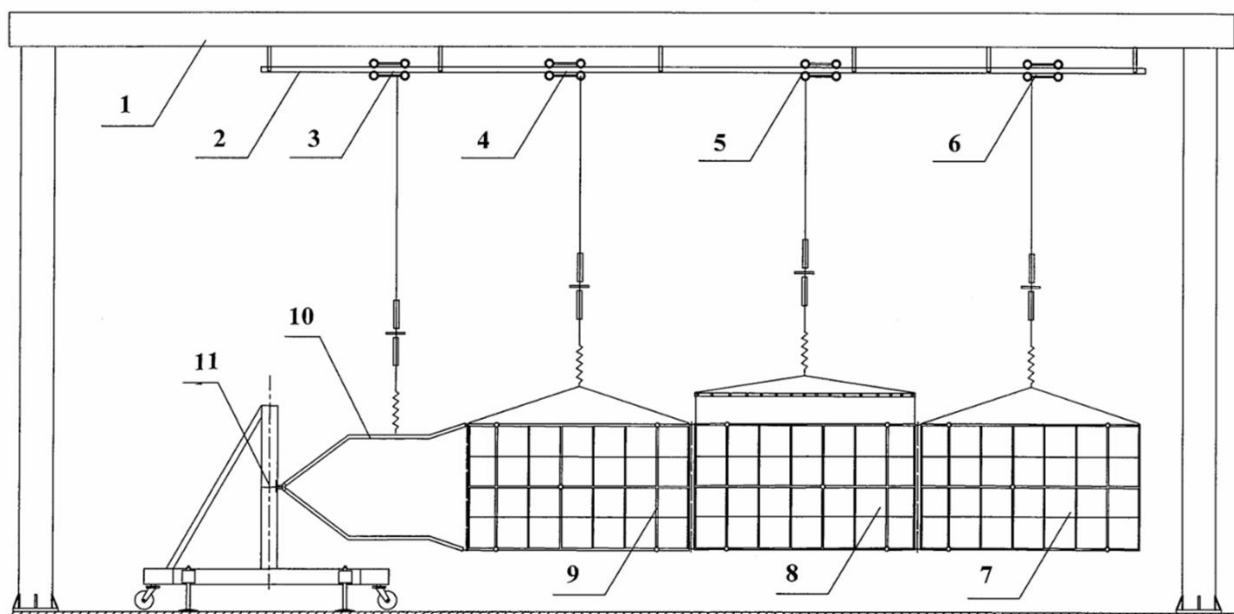


Рисунок 3.2 – Внешний вид активной системы обезвешивания

В комбинированных системах, также называемых активно-пассивными, используются как пассивные, так и активные элементы. При этом в таких системах чаще всего для создания обезвешивающей силы используются пассивные элементы (пружины, противовесы), а для обеспечения необходимой динамики системы используются внешние приводы.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что для достижения наивысшей точности имитации невесомости во время наземных испытаний КТС космического назначения следует использовать активную систему обезвешивания, поскольку она обеспечивает большую точность имитации по сравнению с пассивными и комбинированными

системами. Это достигается за счёт того, что обезвешивающая сила создаётся при помощи приводов, установленных на каретках стенда, что позволяет ослабить или увеличить натяжение троса в зависимости от показаний датчиков силы. Сами каретки перемещаются при помощи собственных приводов, что приводит к уменьшению связи между массами кареток и испытываемой конструкции.

С другой стороны, использование активных элементов приводит к усложнению и удорожанию конструкции. В связи с этим имеет смысл применение пассивных система обезвешивания для испытаний конструкций с невысокой сложностью исполнения либо в тех случаях, когда точность имитации невесомости, требуемая при проведении испытаний, не так высока, как при испытаниях на стендах с активными системами.

Поскольку данная работа посвящена системе стабилизации натяжения троса, то далее рассматриваться будет именно активная система обезвешивания.

3.2. Структурная схема системы стабилизации

Для начала составим структурную и функциональную схемы моделируемого устройства.

Структурная схема отображает взаимосвязи между элементами. В данной схеме изображаются блоки, из которых состоит устройство, и связи между этими блоками с указанием направления связи между компонентами.

3.2.1. Электропривод

Электрический двигатель

Поскольку в предыдущем пункте было отдано предпочтение активной системе обезвешивания, то одним из компонентов системы является привод, состоящий из электрического двигателя и редуктора. Электрический двигатель должен работать в качестве моментного привода, т. е. в идеальном случае его угловая скорость должна быть равна нулю, а момент на валу быть равен моменту нагрузки, создаваемому

обезвешиваемым телом. Учитывая данные особенности привода, следует в качестве электрического двигателя использовать ДПТ вместо асинхронного двигателя (АД), поскольку он, в отличие от асинхронного двигателя, имеет линейную механическую характеристику (рис. 3.3). Также двигателем постоянного тока проще управлять, поскольку единственной управляемой переменной является напряжение якорной обмотки.

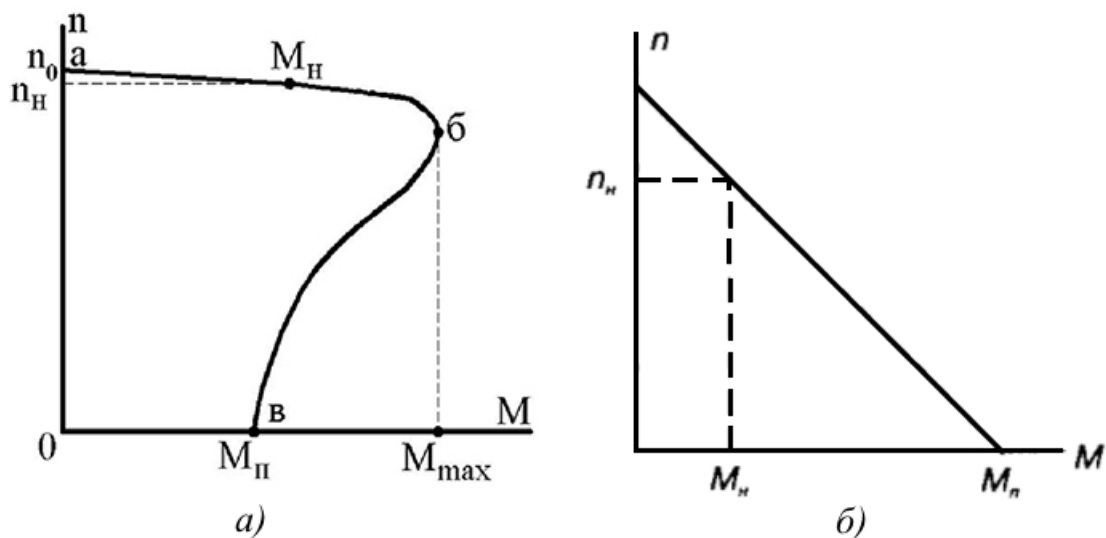


Рисунок 3.3 – Механические характеристики а) АД и б) ДПТ

Редуктор

Редуктор предназначен для уменьшения угловой скорости и повышения момента на выходном валу привода. Редуктор выбирается из требуемых параметров: передаточного числа, массогабаритных показателей, КПД. Дополнительным свойством, полезным для данной системы, является свойство самоторможения, которое достигается, например, в червячных редукторах, работающих без смазки: червячное колесо 2, соединённое с выходным валом, не может провернуть червяк 1, соединённый с валом двигателя (рис. 3.4).

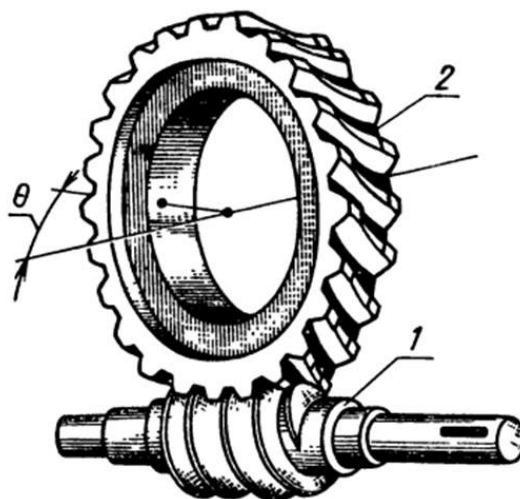


Рисунок 3.4 – Конструкция червячной передачи

В таком случае при непредвиденном или аварийном отключении питания двигателя вал привода не начнёт раскручиваться под действием собственного веса испытуемой конструкции, что предотвратит повреждения или полное разрушение КБС. Также червячные редукторы обладают меньшими массогабаритными показателями, поскольку, в отличие от цилиндрических передач, передаточное число которых имеет ограничение $n < 10$ для одной пары и получения больших значений приходится применять многорядные редукторы, передаточное число червячной передачи для силовых передач может варьироваться в пределах 8–120.

Моментный привод на основе вентильного двигателя

В предполагаемой конструкции каретки системы обезвешивания используется вентильный двигатель. Он представляет собой трёхфазный синхронный двигатель, ротор которого изготовлен с применением постоянных магнитов и фазы которого запитываются постоянным напряжением. Для управления фазами и их коммутации применяются полупроводниковые ключи.

Особенностью моделируемого привода является его работа при практически нулевом значении угловой скорости на валу. При таком режиме работы момент нагрузки равен моменту, создаваемому приводом.

Однако при этом у вентильных двигателей наблюдаются пульсации момента (рис. 3.5).

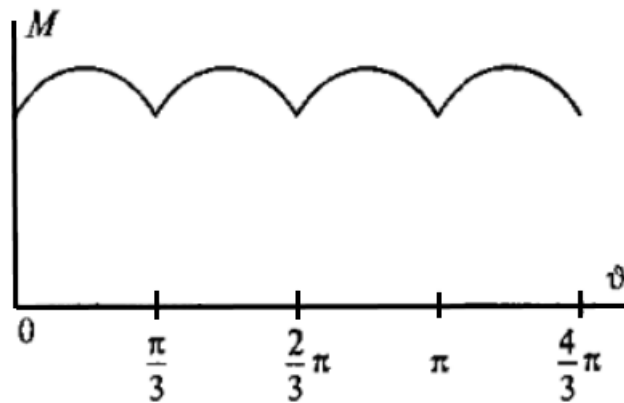


Рисунок 3.5 – Пульсации момента на валу вентильного привода

Пульсации момента достигают примерно $0,134 M_{\max}$. Для привода, работающего в таком режиме, эти пульсации недопустимы, поэтому нужно предпринимать меры по выравниванию момента.

Одним из методов, который позволяет не менять конструкцию двигателя, является использование схемы, изображённой на рис. 3.6.

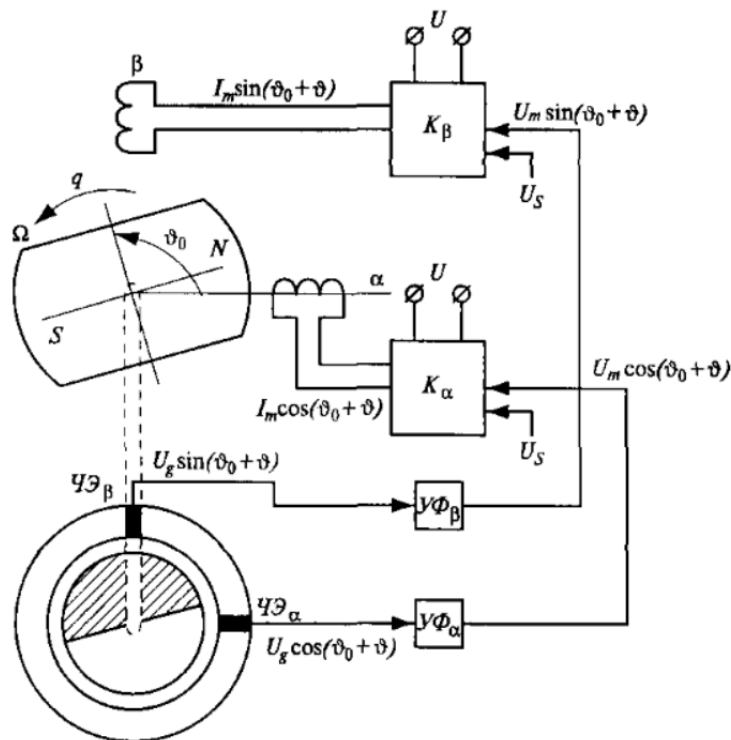


Рисунок 3.6 – Структурная схема моментного привода

Сигналы синусоидальной формы с чувствительных элементов ЧЭ поступают на усилители-формирователи УФ. После усиления сигналы подаются на транзисторные коммутаторы К. Одновременно на коммутаторы подаётся пилообразное напряжение U_s , которое сравнивается с усиленными сигналами датчика положения ротора ДПР:

$$U_g^{\alpha} = U_m \cos(\vartheta_0 + \vartheta);$$

$$U_g^{\beta} = U_m \sin(\vartheta_0 + \vartheta);$$

Если усиленное напряжение чувствительного элемента U больше по абсолютной величине, чем пилообразное напряжение U_s , то вырабатывается сигнал в виде импульсной функции, который открывает ключи коммутатора К и фаза запитывается током, направление которого определяется знаком импульсной функции. Импульс существует на протяжении участка, пока верно неравенство $|U| > |U_s|$. Графическое представление процесса формирования сигнала приведено на рис. 3.7.

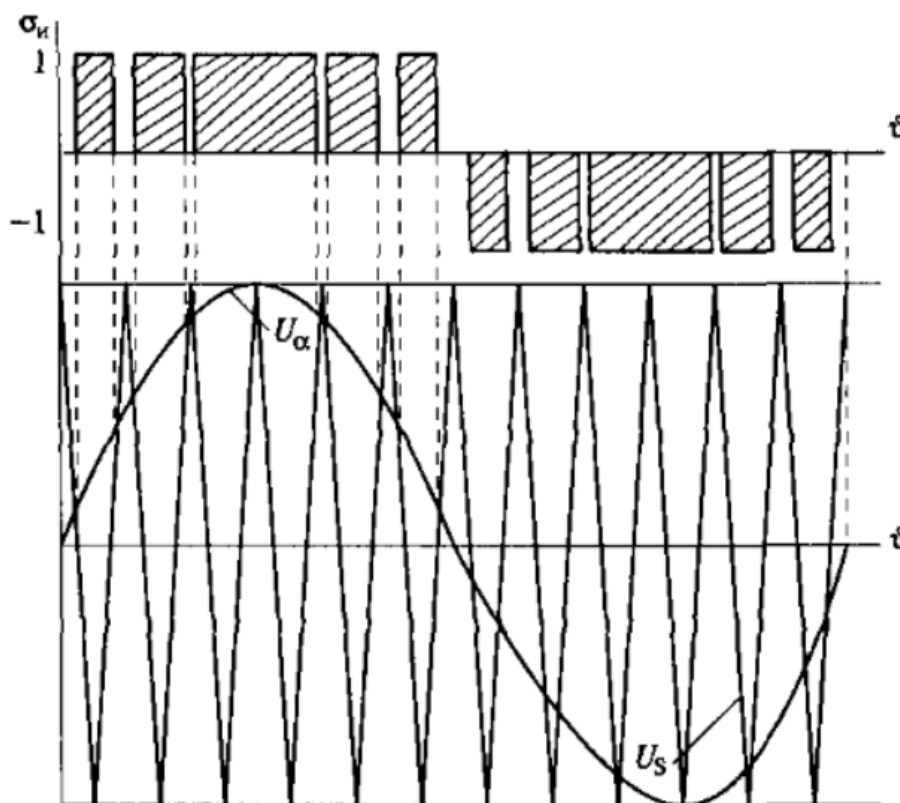


Рисунок 3.7 – Процесс формирования импульсов включения фаз

Такая закономерность формирования длительности включения коммутаторов приводит к преобладанию первой гармоники в кривой тока. При этом гармоники более высоких порядков оказываются пренебрежимо малыми. Для этого должно выполняться условие, что частота пилообразного напряжения должна быть много больше частоты напряжения чувствительных элементов. Частота выходного сигнала ЧЭ вычисляется по формуле:

$$f = \frac{p\omega}{2\pi},$$

где p – число пар полюсов двигателя; ω – угловая скорость двигателя.

Отсюда частота пилообразного напряжения определяется как:

$$f = 10^2 \div 10^3 \frac{p\omega}{2\pi}.$$

3.2.2. Датчик силы

Для контроля создаваемой силы и замыкания обратной связи в системе стабилизации необходимо применение датчика силы. Данные датчики в большинстве случаев являются тензометрическими датчиками. Данные датчики представляют собой конструкцию, которая подвергается сжатию или растяжению под действием внешней силы. Для регистрации деформации применяется резистор, изготавливаемый в виде тонкого металлического слоя. При изменении размеров этого резистора, т. е. при его деформации, происходит изменение его сопротивления. Этот резистор подключается в качестве одного из плеча мостовой схемы (рис. 3.8).

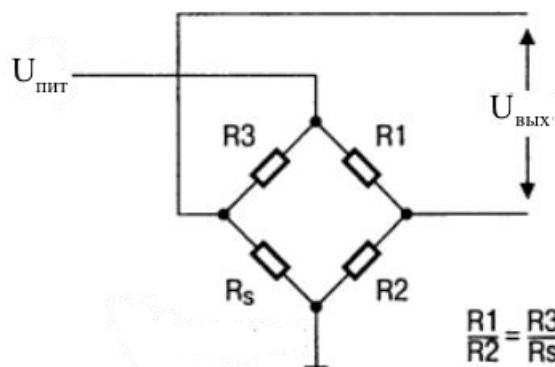


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема тензодатчика

В исходном состоянии в идеальном случае отношения сопротивлений резисторов равны. При этом на выходе мостовой схемы напряжение равно нулю, поскольку мост сбалансирован. При изменении сопротивления R_s деформируемого резистора мост выходит из состояния баланса, и на выходе появляется напряжение. В зависимости от направления приложенной силы изменяется знак выходного сигнала датчика. При растяжении датчика происходит истончение металлического слоя, что приводит к увеличению сопротивления тензорезистора и увеличению потенциала точки 1 и появлению положительного напряжения на выходе датчика. При сжатии происходит обратный процесс, и выходной сигнал становится отрицательным.

Сопротивление тензорезистора обычно равняется 100–150 Ом. Выходное напряжение датчика не зависит от номиналов резисторов, включенных в плечи мостовой схемы. При этом оно зависит от напряжения питания датчика. Однако не смотря на то, что при большем напряжении питания выходной сигнал имеет большее значение, амплитуда выходного напряжения остаётся маленькой (около 150–250 мВ). Поэтому необходимо применение усилителя. Этот усилитель можно встроить в корпус датчика как отдельный модуль.

При прохождении производственной практики на предприятии АО "ИСС" в процессе аттестации датчиков силы было обнаружено явление

гистерезиса, при котором показания датчика силы и угла ДСУ системы измерения векторов сил СИВС отличались в начале и в конце процесса аттестации под влиянием веса измеряемого груза. При этом было отмечено, что после предварительной нагрузки датчика от гистерезиса можно избавиться на время проведения испытаний. Данные, полученные в ходе проведения аттестации, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные, полученные в ходе проведения аттестации датчика ДСУ–100М в первом цикле

$P_{\text{реал}}, \text{ кг}$	$P_{\text{изм}}, \text{ кг}$	$\Delta P, \text{ кг}$
20,000	19,993	0,007
40,000	39,988	0,012
60,000	59,987	0,013
80,000	79,984	0,016
100,000	99,987	0,013
80,000	79,994	0,006
60,000	60,010	-0,010
40,000	40,003	-0,003

Из приведённых в таблице данных видно, что при разгрузке датчика полученные значения получаются точнее значений, полученных при нагрузке датчика.

3.2.3. Контроллер

Контроллеры в САС используются для цифровой реализации закладываемых алгоритмов управления. С точки зрения структурного состава контроллер может быть представлен в виде трёх блоков: АЦП, ЦВМ и ЦАП.

Сигнал, полученный на выходе датчика силы, является аналоговым. Для того, чтобы цифровые устройства могли работать с непрерывным сигналом, его сначала нужно преобразовать в цифровой код. Устройство, которое преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, называется аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

Основными характеристиками АЦП являются его *разрядность* и *разрешение*.

Разрядность характеризует количество дискретных значений, которые может принимать выходной сигнал АЦП. В самых распространённых

АЦП, двоичных, это количество определяется выражением 2^n , где n – разрядность АЦП.

Другой характеристикой является разрешение АЦП. Разрешение определяется разрядностью и опорным напряжением, подводимым к преобразователю и определяет наименьшее значение напряжения, которое может быть измерено АЦП с данной разрядностью при данном уровне опорного напряжения. Минимальное измеренное значение можно определить с помощью выражения $\frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^n - 1}$, где $U_{\max}$, $U_{\min}$ – максимальное и минимальное напряжение, подаваемые на вход АЦП, n – разрядность преобразователя. Максимальное преобразуемое напряжение определяется опорным напряжением АЦП. С учётом того, что выходной сигнал датчика силы принимает только положительные значения, значение можно привести к виду $\frac{U_{\max}}{2^n - 1}$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что при повышении разрядности повышается точность преобразования аналогового сигнала. Также отсюда следует, что для повышения точности следует подводить максимальное преобразуемое напряжение с датчика к значению опорного напряжения АЦП.

Физически АЦП может реализован в двух вариациях: как модуль, встроенный в датчик силы, и как компонент модуля ввода-вывода цифрового контроллера. Первая реализация является практичнее, поскольку имеется использовать микроконтроллер со встроенным преобразователем, который также можно использовать для контроля заряда аккумулятора при автономной работе, передачи цифрового кода к контроллеру при помощи проводных и беспроводных интерфейсов и программной настройки коэффициента передачи датчика. Недостатком такой реализации является то, что разрядность встроенного АЦП редко превышает 10, в то время как разрядность АЦП модулей ввода-вывода может достигать 24.

Кодовая последовательность, полученная на выходе АЦП, передаётся на ЦВУ, где обрабатывается по предварительно составленному алгоритму. В качестве ЦВМ в контроллере выступает микропроцессор. В памяти контроллера хранится значение задающего сигнала $x(t)$, с которым сравнивается значение, полученное с датчика и оцифрованное с помощью АЦП. На основании сравнения этих величин генерируется цифровой код, представляющий собой сигнал управления.

ЦАП необходим для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. ЦАП, также как и АЦП, характеризуется разрядностью и разрешением. Разрешение определяется выражением $\frac{U_{\max}}{2^n - 1}$, аналогичным выражению для АЦП.

Простейшая реализация ЦАП основана на использовании ШИМ. Пример получения синусоидального напряжения, которым запитываются фазы вентильного двигателя, показан на рис. 3.7.

3.2.4. Блок питания

Блок питания необходим для запитывания обмоток двигателя постоянного тока. Современные блоки питания бывают управляемыми и неуправляемыми. Управляемые блоки являются более предпочтительными, поскольку их выходное напряжение и/или выходной ток можно регулировать на основании какого-либо алгоритма, заложенного в ЦВМ. Самым распространённым способом управления является ШИМ, в котором уровень напряжения можно изменять при помощи изменения коэффициента заполнения сигнала. Как уже было показано в пункте 3.2.1, такой способ управления является приемлемым при создании системы управления моментным приводом.

На основании проведённых выше исследований можно составить структурную схему САС, представленную на рис. 3.9.

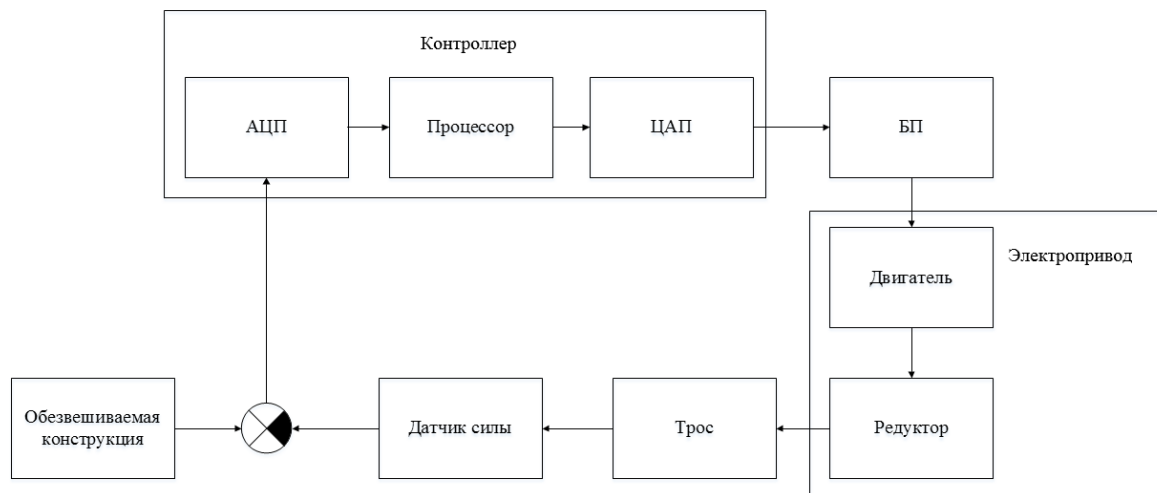


Рисунок 3.9 – Структурная схема САС

3.3. Математическое описание непрерывных линейных звеньев

3.3.1. Электропривод

Электропривод состоит из двух структурных блоков: электрического двигателя и редуктора.

Электрический двигатель в первом приближении имеет передаточную функцию:

$$W_{\text{эд}}(s) = \frac{M_{\text{эд}}(s)}{U_{\text{эд}}(s)} = \frac{k_{\text{эд}}}{T_{\text{эд}}p + 1},$$

где $M_{\text{эд}}$ – момент вращения на выходном валу двигателя;

$U_{\text{эд}}$ – напряжение питания на входе двигателя, поступающее от его блока питания;

$k_{\text{эд}}$ – статический коэффициент передачи серводвигателя;

$T_{\text{эд}}$ – электромеханическая постоянная времени серводвигателя.

Допущения, принятые при моделировании двигателя:

- пульсации момента на валу двигателя пренебрежимо малы;
- не учитывается гистерезис характеристики намагничивания;
- преобразователь представлен безынерционным звеном.

Редуктор в первом приближении можно охарактеризовать передаточной функцией:

$$W_{ред}(s) = \frac{M_{ред}(s)}{M_{эд}(s)} = k_{ред},$$

где $M_{ред}$ – момент вращения на выходном валу редуктора;

$k_{ред}$ – передаточное число редуктора.

Шпуля, на которую наматывается трос, можно описать передаточной функцией:

$$W_{ш}(s) = \frac{F(s)}{M_{ред}(s)} = \frac{1}{R_{ш}},$$

где $R_{ш}$ – радиус намотки на шпулю троса подвеса;

F – сила, создаваемая тросом.

3.3.2. Датчик силы

Датчик силы является безинерционным звеном, которое можно представить в виде передаточной функции:

$$W_{дс}(s) = \frac{U_{дс}(s)}{F(s)} = k_{дс},$$

где

$U_{дс}$ – напряжение на выходе датчика силы, получаемое при приложении силы;

$k_{ред}$ – коэффициент передачи датчика.

ОСС непрерывной части приведена на рис. 3.10.

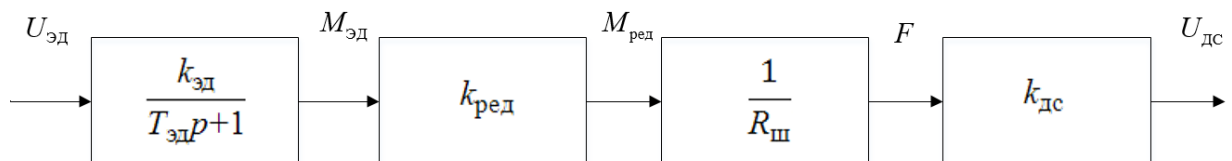


Рисунок 3.10 – ОСС непрерывной части

3.4. Нелинейные характеристики звеньев

3.4.1. Сухое трение редуктора

Для более точного моделирования работы САС следует ввести нелинейные характеристики структурных блоков.

Нелинейностями, которыми обладает редуктор, являются сухое трение и люфт.

Сухое трение

Звеном типа "сухое трение" отображают зависимость моментов сухого трения на валах вращающихся двигателей и приводимых ими в движение механизмов. Сухим трением называют трение, которое возникает в случае отсутствия какой-либо смазки или другого слоя. В таком случае для того, чтобы механизм начал своё движение, ему необходимо приложить некоторое усилие. Например, если момент сухого трения равен $M_{ст0}$, то при движущем моменте, меньшем чем $M_{ст0}$ механизм не тронется с места.

Математически это звено может быть описано формулой

$$M_{cm} = M_{cm0} \operatorname{sign} \frac{d\alpha}{dt}$$

где $M_{ст0}$ – момент сухого трения, приведённого к валу двигателя;

$\frac{d\alpha}{dt}$ – скорость вращения вала двигателя.

Вход-выходная характеристика звена изображена на рис. 3.11.

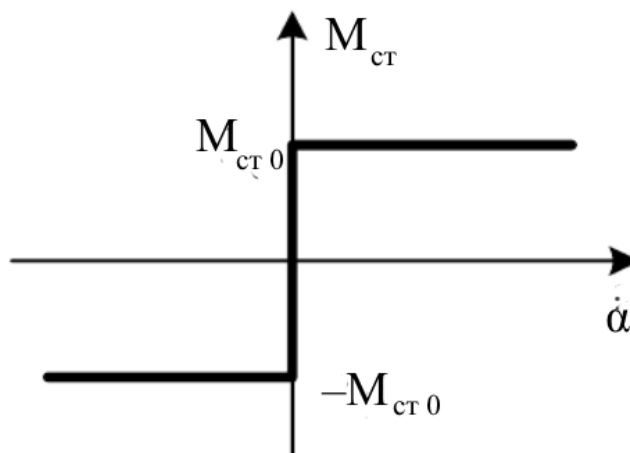


Рисунок 3.11 – Вход-выходная характеристика звена "сухое трение"

3.4.2. Люфт редуктора

Другой нелинейной характеристикой редуктора является люфт в редукторе, который, как видно из названия, обуславливается наличием механических зазоров между зубьями червяка и колеса червячной передачи.

Если оба звена вращались в момент смены направления вращения, то ведомое звено останавливается, но мгновенного изменения положения не производит. Для этого ведущему звену необходимо пройти некоторое расстояние, равное $2a$ (рис. 3.10). Этот параметр, по сути, является характеристикой редуктора и разных его конфигураций он будет тоже разным и определяется параметрами зубьев червяка и колеса.

Вход-выходная характеристика звена изображена на рис. 3.12.

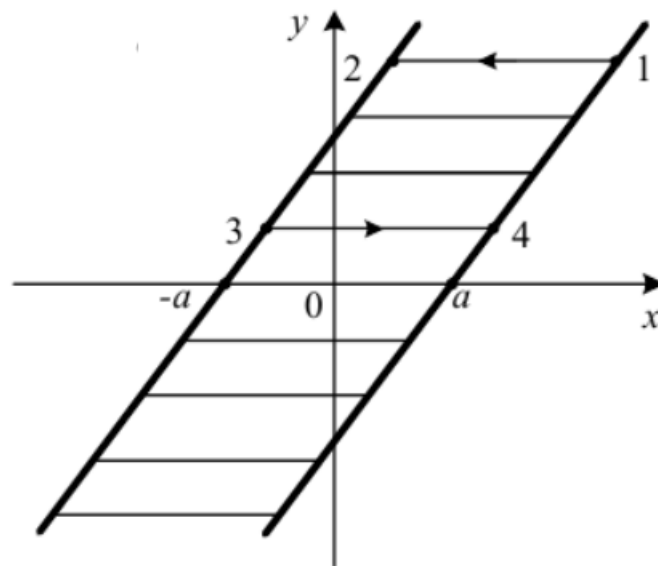


Рисунок 3.12 – Вход-выходная характеристика звена "люфт"

Для того, чтобы перейти из состояния 1 в состояние 4, сначала нужно пройти через состояния 2 и 3.

Крутизна наклона характеристики определяется коэффициентом передачи редуктора, т. е. его передаточным числом.

Для работы систем с нелинейными характеристиками были созданы различные способы исследования их устойчивости и переходных процессов. Одним из таких методов является метод гармонической линеаризации. Согласно этому методу нелинейное звено можно заменить линеаризованным звеном с передаточной функцией нелинейного звена:

$$W_{нз}(A, p) = q(A) + \frac{q'(A)}{\omega} p.$$

При подстановке $p = j\omega$ получается выражение:

$W_n(A) = q(A) + jq'(A)$, называемое частотной передаточной характеристикой.

$q(A)$ называется вещественным, а $q'(A)$ – мнимым коэффициентом гармонической линеаризации. Эти коэффициенты определяются типом нелинейности и их параметрами. Например, для звена типа "люфт" таким параметром является величина люфта a .

Вещественный и мнимый коэффициенты гармонической линеаризации для нелинейности типа "люфт":

$$q(A) = \frac{k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{2a}{A} \right) + 2 \left(1 - \frac{2a}{A} \right) \sqrt{\frac{a}{A} \left(1 - \frac{a}{A} \right)} \right];$$

$$q'(A) = -\frac{4ka}{\pi A} \left(1 - \frac{a}{A} \right), A \geq a.$$

3.5. Математическое описание контроллера

Как уже отмечалось выше, основными структурными составляющими являются АЦП, ЦВМ и ЦАП. В данном подразделе будут рассмотрены более подробно в каждый из этих блоков.

3.5.1. Аналогово-цифровой преобразователь

АЦП предназначен для преобразования аналогового напряжения в двоичный код. Процесс преобразования можно условно разбить на три операции: квантование по времени, квантование по уровню и кодирование.

На входе АЦП стоит ключ, главной характеристикой которого является *период дискретизации* T . На данном этапе происходит процесс квантования по времени. Это происходит по той причине, что АЦП может фиксировать значения входной величины только в моменты времени $t = iT$.

В процессе квантование по уровню весь диапазон изменения непрерывной величины разбивается на 2^n квантов. Разрешающая способность была выведена в п.3.2.3. Такое количество квантов необходимо для однозначного присвоения каждому интервалу своего двоичного кода.

Графически АЦП может быть представлен в виде многопозиционного реле (рис. 3.13).

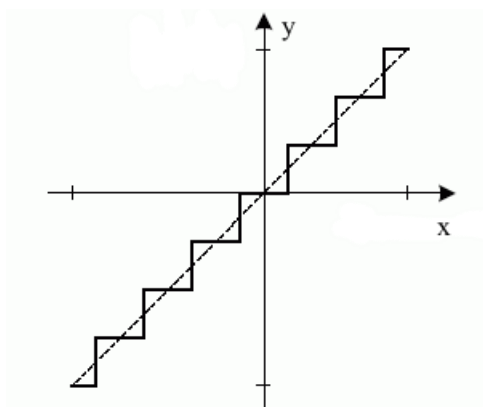


Рисунок 3.13 – Вход-выходная характеристика АЦП

В настоящее время разрядность АЦП обычно достаточно велика ($n \geq 10$). Если $n=10$, то количество квантов тогда равно 1023. При условии, что наибольший сигнал с датчика силы равен 6 В, наименьшее измеренное значение равно $6/1023 = 0,0058$ В. Отсюда можно сделать вывод, что нелинейностью АЦП можно пренебречь и представить АЦП линейной характеристикой. Коэффициент передачи АЦП равен:

$$k_{\text{АЦП}} = \frac{1}{\delta_{\text{АЦП}}},$$

где $\delta_{\text{АЦП}}$ – разрешающая способность АЦП.

3.5.2. Цифро-аналоговый преобразователь

ЦАП предназначен для преобразования двоичного кода в аналоговый сигнал.

Как уже отмечалось выше, основными характеристиками ЦАП являются его разрядность и разрешающая способность.

В процессе преобразования каждому значению кода ставится в соответствие фиксированное значение непрерывного сигнала. По сути это означает наличие квантования по уровню. Число значений, как и в случае АЦП, определяется выражением $2^n - 1$.

На выходе ЦАП стоит ключ, основной характеристикой которого является период дискретизации T . Функцию фиксации и удерживания непрерывного сигнала на одном уровне в течение периода T выполняет формирующее устройство, которое называется экстраполятором нулевого порядка. Передаточная функция экстраполятора:

$$W_{\phi}(s) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}.$$

Как и в случае с АЦП, разрядность ЦАП обычно достаточно велика ($n \geq 10$). По аналогии нелинейную характеристику ЦАП можно заменить линеаризованной характеристикой, при этом

$$k_{\text{ЦАП}} = \delta_{\text{ЦАП}},$$

где $\delta_{\text{ЦАП}}$ – единица младшего разряда для выходной величины.

3.5.3. Цифровая вычислительная машина

ЦВМ используется для формирования программ управления и цифровой реализации алгоритмов управления или корректирующих устройств.

ЦВМ в операторно-структурной схеме может быть описана передаточной функцией дискретного звена, имеющего вид

$$D_{\text{ЦВМ}}(z) = \frac{U(z)}{X(z)}.$$

Для каждого закона управления, реализуемого в непрерывных системах (П, ПИ, ПД и ПИД-регулирование) существуют аналоги в цифровых системах. Аналогом ПИД-закона является пропорционально-суммарно-разностный закон (ПСР-закон). В таком случае $D(z)$ записывается

$$D_{\text{ЦВМ}}(z) = k_n + k_c \frac{z}{z-1} + k_p \frac{z-1}{z}.$$

3.6. Методы синтеза цифрового регулятора

Одним из методов синтеза цифрового регулятора произвольной структуры является *метод полиномиальных уравнений*.

Пусть известна передаточная функция приведённой непрерывной части системы $W(s)$. Приведённой передаточной функцией непрерывной части является произведение передаточной функции неизменяемой непрерывной части $W_0(s)$ (в данном случае, электропривод, шпуля и датчик силы) и передаточной функции формирователя $W_\Phi(s)$. При помощи Z-преобразования найдём дискретную передаточную функцию:

$$W(z) = Z \{W(s)\}.$$

Также известна желаемая дискретная передаточная функция, обозначаемая $W_{ж}(z)$. Требуется синтезировать регулятор, при котором передаточная функция синтезированной системы будет равная передаточной функции желаемой системы:

$$W_{c.c.}(z) = \frac{W_p(z)W(z)}{1 + W_p(z)W(z)} = W_{ж}(z).$$

Отсюда находится передаточная функция регулятора:

$$W_p(z) = \frac{1}{W(z)} \frac{W_{ж}(z)}{1 - W_{ж}(z)}.$$

Важными требованиями при синтезе регулятора являются его физическая реализуемость и грубость.

Другим способом использования ЦВМ в цифровой системе управления является перекладывание функции коррекции и регулирования с ЦВМ на непрерывный регулятор, работающий по ПИД-закону. В таком случае передаточная функция ЦВМ становится $D(z)=1$ и система формально становится импульсной, поскольку их структурные схемы становятся идентичными. При этом фактически системы останутся принципиально разными.

Структура цифровой системы остаётся неизменной (АЦП, ЦВУ, ЦАП). На ЦВМ в таком случае возлагается только функция сравнения задающего сигнала и сигнала с датчиков и вычисления ошибки на их основе и формирование самого задающего на основе алгоритма.

Такое применение контроллера крайне нерационально, поскольку даже микроконтроллеры способны проводить расчёты и реализовывать алгоритмы управления за краткие периоды времени. В моделируемой системе используется промышленный контроллер, который имеет большие вычислительные мощности. Также некоторые типы управления (программы наведения, нелинейные алгоритмы, алгоритмы самонастройки и др.) не могут быть реализованы при помощи аналоговых средств. В случае $D(z)=1$ ресурсы контроллера остаются незадействованными, что является, как уже утверждалось выше, нерациональным.

Ещё одним методом синтеза является синтез на основе непрерывной модели регулятора. В таком случае цифровой контроллер заменяется аналоговым регулятором. Далее проводится синтез непрерывного регулятора любым известным методом или проводится также известными методами настройка параметров ПИД-регулятора. Затем проводится аппроксимация непрерывной передаточной функции дискретной передаточной функцией. На данном способе основаны два метода – метод Тутсена и метод Эйлера.

Метод Тутсена, также называемый методом трапеций, заключается в аппроксимации непрерывной передаточной функции дискретной передаточной функцией при помощи трапеций (рис. 3.14), при котором s заменяется на $\frac{2(z-1)}{T(z+1)}$.

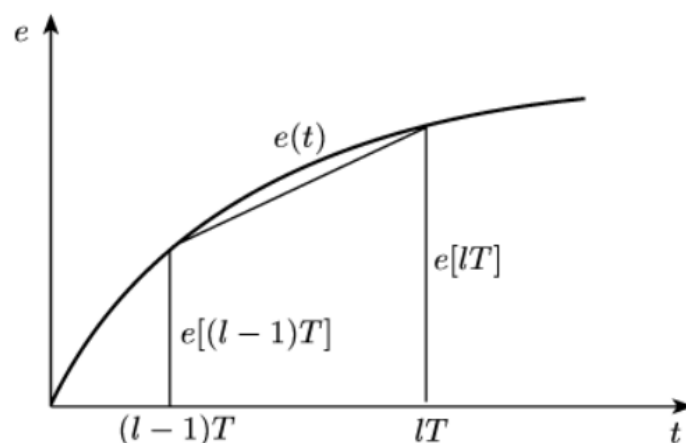


Рисунок 3.14 – Аппроксимация трапецией

Метод Эйлера заключается в аппроксимации производной конечными разностями:

$$\text{прямой: } pe(t) \cong \frac{e(t+T) - e(t)}{T} = \frac{E-1}{T} e(t);$$

$$\text{или обратной: } pe(t) \cong \frac{e(t) - e(t-T)}{T} = \frac{E-1}{TE} e(t).$$

На основе этих равенств s заменяется на $\frac{z-1}{T}$ или $\frac{z-1}{Tz}$.

ОСС цифровой части схемы САС может быть представлена в виде, изображённом на рис. 3.12.

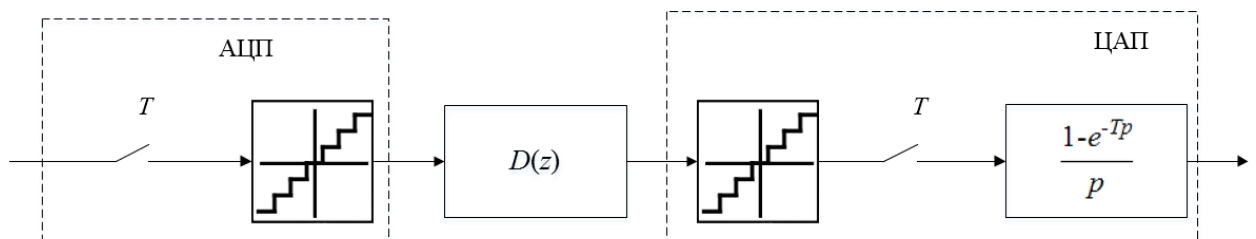


Рисунок 3.15 – ОСС цифровой части

С учётом приведённых выше упрощений схему привести к виду, показанном на рис. 3.13.

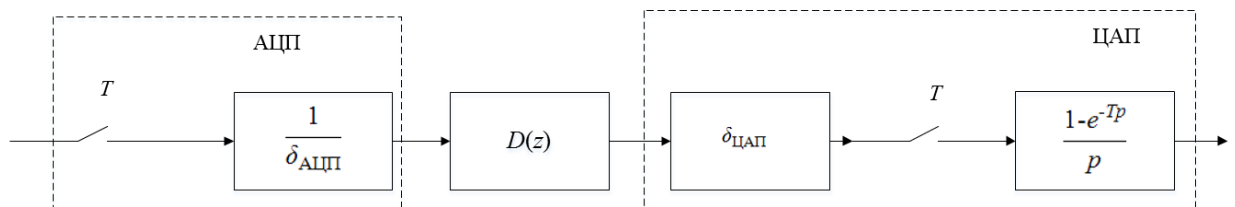


Рисунок 3.16 – ОСС цифровой части с упрощениями

4. Преобразование ОСС к конечному виду

После того, как были описаны отдельные блоки САС (непрерывная и цифровая составляющие), можно составить ОСС системы в целом. Схема изображена на рис. 4.1.

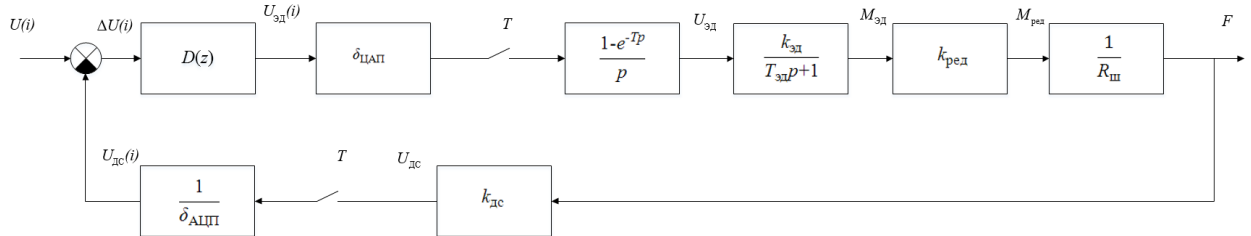


Рисунок 4.1 – ОСС системы автоматической стабилизации натяжения тросов

Коэффициенты АЦП и ЦАП можно перенести в непрерывную часть. Тогда приведённая передаточная функция непрерывной части без учёта нелинейных характеристик будет иметь вид

$$W_{\Pi}(s) = k_{\text{АЦП}} k_{\text{ЦАП}} k_{\text{ред}} k_{\text{ДС}} \frac{k_{\text{эд}}}{T_{\text{эд}}s + 1} \frac{1}{R_{\text{ш}}}$$

или

$$W_{\Pi}(s) = \frac{k}{T_{\text{эд}}s + 1} \frac{1 - e^{-Ts}}{s}, \text{ где } k = \frac{k_{\text{АЦП}} k_{\text{ЦАП}} k_{\text{ред}} k_{\text{ДС}} k_{\text{эд}}}{R_{\text{ш}}}.$$

Найдём дискретную передаточную функцию:

$$W_{\Pi}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ k \frac{k_{\text{эд}}}{(T_{\text{эд}}s + 1)} \right\} = \frac{k(z-1)}{T_{\text{эд}}(z - e^{-1/T_{\text{эд}}})}.$$

Теперь в системе есть два звена: звено регулятора с передаточной функцией $W_p(z)$ и звено приведённой непрерывной части, которой соответствует дискретная передаточная функция $W_{\Pi}(z)$. Преобразованная ОСС системы изображена на рис. 4.2.

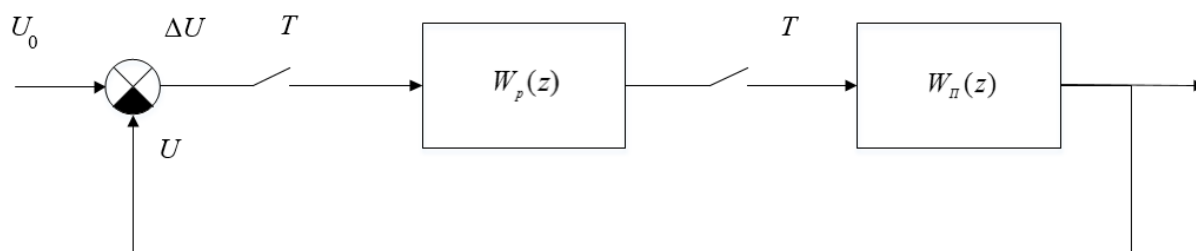


Рисунок 4.2 – Преобразованная ОСС

Для моделирования работы системы на ПК необходим программный продукт, который позволял бы задавать параметры неизменяемой части системы и регулятора и изменять их. Возможно два решения:

1. Написание собственного программного продукта, написанного на языке программирования высокого уровня.
2. Использование специализированных пакетов для математических расчётов.

Первый путь можно избрать в том случае, если на предприятии, на котором проводятся испытания, нет нужного программного обеспечения или не имеется возможности его закупить. Другой причиной для этого пути может быть желание заказчика иметь собственный продукт, независимый от внешних производителей ПО. Преимуществом данного подхода является возможность подстройки ПО исключительно для нужд специалиста, проводящим моделирование. Это подразумевает оптимизацию потребления вычислительных ресурсов, исключение ненужных модулей программы и дополнений, возможный учёт особенности моделируемой системы, которые не могут быть учтены при работе с другим ПО. Недостатками являются дополнительные временные и денежные затраты на изготовление программного продукта, невозможность внесения в модель изменений к коротким срокам ввиду закрытости кода в случае изменения элементной базы или свойств комплектующих.

Альтернативой является использование специализированных программных пакетов, созданных для проведения математических и инженерных расчётов. Одним из таких пакетов является Matlab.

Matlab является одной из самых известных программ для расчётов и моделирования. В её состав входит компонент под названием Simulink. Simulink позволяет проводить моделирование как непрерывных, так и дискретных систем. В случае непрерывных систем есть возможность моделирования большинства нелинейных звеньев, в том числе звеньев типа "сухое трение" и "люфт". На рис. 4.3 изображена схема, созданная в Simulink, на основе приведённой выше операторно-структурной схемы, приведённой на рис. 4.1.

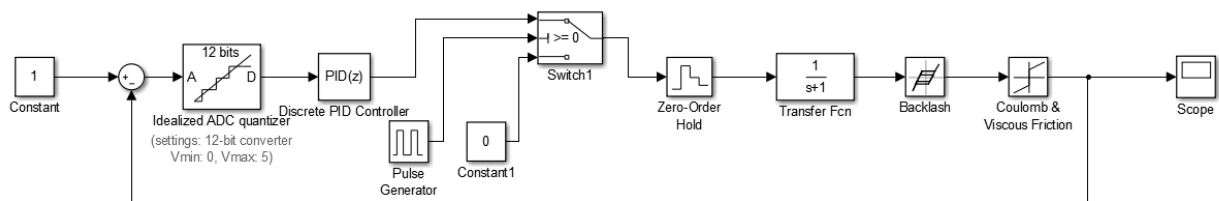


Рисунок 4.3 – OCC в Simulink

На данной схеме изображены такие подсистемы, как:

АЦП (блок Idealized ADC quantizer);

ПСП-регулятор (блок Discrete PID Controller);

экстраполятор нулевого уровня (блок Zero-Order Hold);

передаточная функция неизменяемой части (блок Transfer Fcn);

нелинейности типа "люфт" и "сухое трение" (блоки Backlash и Coulomb Friction).

Каждый из этих блоков является полностью настраиваемым. Например, для блока Transfer Fcn параметрами являются коэффициенты при s^n как в числителе, так и в знаменателе. Для блока Idealized ADC quantizer можно установить разрядность, диапазон преобразуемой величины.

Также данный пакет позволяет выводить графическую информацию в виде графиков АЧХ и ФЧХ, переходной и весовой функций, положение

полюсов системы и др. Также существует возможность создания собственных, пользовательских блоков в случае отсутствия нужного в списке стандартных.

Подробное описание программного продукта представлено в приложении А.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был проведён анализ различных конструкций стендов систем обезвешивания и способы их моделирования. В ходе анализа были выяснены основные особенности каждого класса стендов обезвешивания и преимущества и недостатки методов моделирования.

При создании структурной схемы устройства помимо простого описания компонентов был проведён анализ с целью обоснования использования конкретного типа того или иного элемента. Также был описан принцип действия устройств, что было выполнено для демонстрации понимания работы системы.

В процессе разработки были определены математические зависимости, описывающие элементы стенда. Было выяснено, что помимо линейных зависимостей в системе наличествуют нелинейные характеристики, связанные с особенностями функционирования редуктора в исследуемой системе.

Другим аспектом в данной работе было исследование цифровой части САС НТ. В данном пункте были рассмотрены преобразующие устройства и ЦВМ, выполняющая функции регулятора в данной системе. Дальнейшие исследования были выполнены по теме настройки и синтеза дискретного регулятора, который реализуется с помощью данной машины.

Для удобства вычислений и совмещения непрерывной и цифровой частей непрерывная была преобразована в дискретную. На основе полученной ОСС можно проводить настройку ПСР-регулятора или синтез регулятора произвольного вида в соответствии с алгоритмом управления и параметрами моделируемых устройств. Также был предложен программный продукт для выполнения расчётов на ЭВМ.

В будущем возможно усовершенствование модели путём более детального рассмотрения и учёта нелинейностей типа "люфт" и "сухое трение", а также замены модели двигателя в первом приближении

моделью вентильного двигателя с учётом его конструктивных особенностей.