Реферат

Выпускная квалификационная работа имеет 127 страниц, 50 рисунков, 13 таблиц, 19 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: крыло батареи солнечной, стенд обезвешивания, следящая система, система вертикальных перемещений.

Объектом исследования является стенд для испытания приводов раскрытия крыла солнечной батареи при наземных испытаниях

Цель работы – математическое моделирование стенда активной системы обезвешивания.

В процессе исследования проводился анализ существующих конструкций активных и пассивных стендов обезвешивания, разрабатывались математические модели в форме операторно – структурных схем, а также проводилось имитационное моделирование с целью изучения характера динамики, а также синтеза регуляторов.

В результате исследования была получена математическая модель процессов стендовых испытаний.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: стенд для обезвешивания одной панели имеет две каретки отслеживающие перемещение объекта в горизонтальном направлении, а также систему вертикальных перемещений призванную создавать усилие, которое компенсирует внешнее воздействие тем самым достигая эффект обезвешивания.

Степень внедрения. Данная диссертационная работа выполнена в рамках хоздоговорной опытно – конструкторской работы «Математическое моделирование и исследование автоматизированной многоканальной активной системы обезвешивания с каретками» по заказу Конструкторско – технологического института научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук.

Область применения: космическая промышленность.

Фактором экономического эффекта, реализуемым в предложенной работе является возможность сокращения рисков, ошибок при техническом контроле.

Оглавление Реферат.....Ошибка! Закладка не определена. Определения, обозначения, сокращения Ошибка! Закладка не определена. Введение...... Ошибка! Закладка не определена. 1 Аналитический обзор систем обезвешивания...... 6 1.1 12 2 Объект и методы исследования..... 12 Особенности использования систем перемещения объектов на гибком 2.1 2.2 Описание части тросового подвеса между шпулей и датчиком силы в статическом режиме работы 17 Статика подвеса элемента крыла солнечной батареи при не строго 2.3 2.4 3 3.1 3.1.1 Математическое описание самого привода 30 3.1.2 Режимы работы сервопривода...... 35 3.2 Математическое описание электромеханической электромеханических систем перемещения объектов 44 Математическое моделирование системы вертикальных перемещений 3.3 3.4 Математическое моделирование системы горизонтальных перемещений 49 3.5 Определение параметров характеризующие упруго -диссипативные свойства элементов следящей системы и системы активного обезвешивания экспериментальным методом 54 4 4.1 Имитационное моделирование системы обезвешивания и синтез Имитационное моделирование следящей системы и синтез регуляторов 4.2 (системы горизонтальных перемещений) 59

4.3 Техническая реализация систем автоматического регулирования. 63

5 Технико-экономическое обоснование работы.....Ошибка! Закладка не определена.

5.1 Организация и планирование работ. Ошибка! Закладка не определена.
5.1.1 Определение трудоемкости выполнения работ...Ошибка! Закладка не определена.

5.1.2 Разработка календарного плана работ.....Ошибка! Закладка не определена.

5.2 Расчет материальных затрат..... Ошибка! Закладка не определена.

5.2.1 Расчет заработной платы основных исполнителей проекта..... Ошибка! Закладка не определена.

5.2.2 Отчисления во внебюджетные фонды.....Ошибка! Закладка не определена.

5.2.3 Расчет затрат на электроэнергию... Ошибка! Закладка не определена.

5.2.4 Расчет амортизационных расходов Ошибка! Закладка не определена.

5.2.5 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных).Ошибка! Закладка не определена.

5.2.6 Накладные расходы Ошибка! Закладка не определена.

5.2.7 Расчет себестоимости разработки математической модели Ошибка! Закладка не определена.

5.2.8 Расчет прибыли Ошибка! Закладка не определена.

5.2.9 Расчет НДС Ошибка! Закладка не определена.

5.2.10 Цена разработки НИР..... Ошибка! Закладка не определена.

5.3 Оценка экономической эффективности проекта....Ошибка! Закладка не определена.

5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИРОшибка! Закладка не определена.

6 Социальная ответственность Ошибка! Закладка не определена.

6.1 Отклонения показателей микроклиматаОшибка! Закладка не определена.

6.2	Недостаточная освещённость рабочей	зоны; отсутствие или недостаток
есте	ественного светаО	шибка! Закладка не определена.
6.3	Повышенный уровень шумаО	шибка! Закладка не определена.
6.4	ЭлектробезопасностьО	шибка! Закладка не определена.

Заключение	. 67
Список публикаций	. 68

Введение

Развитие космической промышленности на территории постсоветского пространства приводит к росту строительства в этой области. Производство космических кораблей и спутников бесспорно является науко – трудоемкой отраслью. Прежде чем вывести космический спутник на орбиту необходимо провести ряд испытаний с целью выявления каких – либо недостатков, дефектов. Такими испытаниями могут быть являться имитационное, физическое, математическое моделирование.

Процесс физического моделирования должен отвечать условиям которые максимально приближенны к реальным. К таким условиям относится невесомость.

Имитация невесомости является одной из главных задач, решением которой может быть применение активной системы обезвешивания [1].

В этой связи актуальность диссертационного исследования заключается в разработке математической модели системы обезвешивания с целью создания в дальнейшем физического прототипа.

Объектом исследование является стенд активной системы обезвешивания.

Предметом исследования является разработка адекватной математической модели стенда активного обезвешивания.

Практическая значимость заключается в применении результатов математического моделирования при разработки стенда, расчет коэффициентов регулятора, а также исследование динамики поведения элементов системы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

-разработке математической модели для стенда с уникальной конструкцией;

-разработке регулятора с переменным интегральным коэффициентом формируемым по нечеткому закону.

Реализация и апробация работы. Основные положения и научные результаты магистерской диссертации на научно – технических конференциях: Математическое моделирование синхронного привода с постоянными магнитами в составе электромеханической силокомпенсирующей системы [Электронный ресурс] // XIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Texнологии Microsoft в теории и практике программирования»: Томск, 22-23 апреля 2016. - Томск: ТПУ., Исследование свойств вертикального динамических канала активной силокомпенсирующий системы [Электронный ресурс] // IV Всероссийский молодежный форум с международным участием «Инженерия для освоения космоса»: Томск, 2016 г. С. 45-48.

1 Аналитический обзор систем обезвешивания

В настоящее время для проведения наземных испытаний приводов раскрытия крыльев космических кораблей используют различные типы систем обезвешивания. Рассмотрим основные принципы построения и функциональные назначения этих систем.

Системы обезвешивания являются узкоспециализируемыми И предназначены для испытания определенного типа крупногабаритных трансформируемых объектов (панели солнечных батарей, рефлекторов и т.д.). По этой причине проведение сравнительного анализа является задачей сложной но, тем не менее, можно условно разделить все системы обезвешивания на различные классы И производить сравнительную оценку систем, принадлежащих к этим различным классам.

По своему исполнению системы обезвешивания делятся на активные, пассивные и комбинированные.

1.1 Пассивные системы обезвешивания

В пассивных системах обезвешивания перемещение и компенсация сил происходи за счёт внутренних моментов генерируемых самой системы. Эффект обезвешивания достигается за счет применения различных противовесов, пружин и др. На рисунке 1 показан пример пассивной системы.



Рисунок 1 – Пример пассивной системы обезвешивания

Широко известны различные системы обезвешивания, использующие архимедову силу (использование воздушных шаров-аэростатов, погружение обезвешиваемого изделия в бассейн с жидкостями и т. д.). Такие системы являются пассивными и ввиду того, что существенную роль при использовании сопротивление окружающей таких систем влияет среды (приходится преодолевать силы вязкости), они не могут быть использованы для испытаний, требуется динамика перемещения где высокая относительного обезвешиваемых частей. Другим классом таких систем являются пассивные механические системы С использованием различных трособлочных конструкций, на которых "вывешиваются" обезвешиваемые части. Можно привести несколько примеров использования таких систем, описанных в различных источниках. Например:

Устройство для обезвешивания горизонтально перемещающейся многозвенной механической системы космического аппарата. (Патент на изобретение №: 2376217).

Изобретение относится к наземным имитационным испытаниям космических аппаратов (КА). Устройство содержит раму, закрепленную в верхней части КА и снабженную секционной штангой. Штанга связана посредством вертикально установленных регулируемых пружин обезвешивания с горизонтально перемещающимися звеньями многозвенной механической системы. Звенья уложены W-образно («гармошкой»). На между собой секциях штанги горизонтально подвешен закрепленных направляющий трос. Один конец троса закреплен на секции, наименее удаленной от КА, а другой конец посредством механизма натяжения связан с наиболее удаленной от КА секцией. Регулируемые пружины взаимодействуют посредством опорных элементов с направляющим тросом, имея возможность перемещения по тросу. Направляющий трос в плане находится над звеньями механической системы в их рабочем положении. Регулируемые пружины связаны со звеньями в точках, расположенных в вертикальных плоскостях

симметрии этих звеньев. На раме вертикально закреплена П-образная разгрузочная арка.

Устройство для обезвешивания вертикально перемещающейся маложесткой механической системы космического аппарата (патент РФ № 2273592).

Изобретение относится К средствам наземных имитационных испытаний и подготовки к полету систем космического аппарата. Предлагаемое устройство содержит противовес, соединяемый тросом, проходящим через установленные на опорной стойке блоки, с испытываемой маложесткой механической системой. Данная система снабжена фиксирующим замком для ее удержания на космическом аппарате. При этом опорная стойка закреплена на космическом аппарате и снабжена приемной площадкой, установленной с возможностью взаимодействия с ней указанного противовеса. На приемной площадке со стороны противовеса закреплена амортизирующая подкладка. Технический результат изобретения состоит в уменьшении возмущающего бокового усилия на испытываемую маложесткую систему, а также в возможности применения одного устройства для обезвешивания аналогичных систем космических аппаратов при различных типоразмерах последних.

Известно устройство для обезвешивания горизонтально перемещающихся механических систем космических аппаратов, содержащее закрепленную на полу либо на потолке сооружения опорную раму, в горизонтальной направляющей которой установлена подвижная каретка, связанная тросом, снабженным регулятором натяжения, с маложесткой механической системой космического аппарата, снабженной фиксирующим замком и установленной с возможностью ее горизонтального перемещения (см., например, К.С. Колесников "Динамика разделения ступеней летательных аппаратов", Москва, "Машиностроение", 1977 г., стр. 211–212).

Известно устройство для обезвешивания горизонтально перемещающихся механических систем космических аппаратов, содержащее закрепленную на полу либо на потолке сооружения опорную раму, в горизонтальной направляющей которой установлена подвижная каретка, связанная тросом, снабженным регулятором натяжения, с маложесткой механической системой космического аппарата, снабженной фиксирующим замком и установленной с возможностью ее горизонтального перемещения (см., например, К.С. Колесников "Динамика разделения ступеней летательных аппаратов", Москва, "Машиностроение", 1977 г., стр. 211–212).

Имеется множество других аналогичных систем. Все эти системы также являются пассивными и обладают схожими недостатками, а именно:

– влияние трения в трособлочных узлах и шарнирах системы обезвешивания на работу механизма трансформации объекта испытаний.
 Необходимо также учитывать, что величина этих паразитных сил резко нарастает с ростом габаритов и массы объекта испытаний;

 – влияние т. н. присоединенной массы системы обезвешивания на работу механизма трансформации объекта испытаний;

 ограниченное число (обычно несколько единиц) обезвешиваемых частей объекта испытаний;

 – ограниченный диапазон перемещений обезвешиваемых элементов по вертикали и в горизонтальной плоскости.

1.2 Активные системы обезвешивания

В активных системах обезвешивания компенсирующий момент создается электроприводами. Пример показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – пример активной системы обезвешивания

В работе [] показано, что активные системы обезвешивания обладают целым рядом достоинств по сравнению с пассивными. К этим достоинствам можно отнести следующие:

 возможность гибкой и быстрой адаптации системы под задачи НЭО широкого класса объектов;

- возможность автоматизации процесса испытаний;

 возможность (за счет применения специализированных алгоритмов управления) минимизации на работу систем и механизмов объекта испытаний влияния трения в узлах и сочленениях системы обезвешивания, а также "присоединенной" массы этой системы;

 возможность наращивания количества обезвешиваемых элементов и их диапазонов перемещений;

 возможность резкого увеличения динамики перемещения обезвешиваемых объектов. Из обзора существующих в открытом доступе описаний различных систем обезвешивания можно сделать выводы, что разрабатываемая в рамках настоящей диссертации система обладает следующими преимуществами и достоинствами:

 – большой диапазон перемещений обезвешиваемых элементов в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

возможность одновременного обезвешивания 12 независимых
 элементов КБС и 36 независимых элементов при испытаниях рефлекторов;

возможность перемещения обезвешиваемых элементов со скоростями до 1м/с и ускорениями до 0.5 м/с²;

– возможность быстрой адаптации при смене объекта испытаний;

возможность автоматической архивации данных, полученных в ходе
 НЭО

2 Объект и методы исследования

2.1 Особенности использования систем перемещения объектов на гибком подвесе

В разрабатываемом стенде для наземных испытаний механических устройств крыльев солнечных батарей с активным обезвешиванием отдельных элементов КБС подвес последних осуществляется на тросах на размещаемых над испытуемым КБС каретках. Эти каретки движутся по горизонтально установленным под потолком цеха двум направляющим (такие направляющие в стенде установлены по вертикали на трех уровнях).

В принятом в СОА конструктивном исполнении верхней точкой закрепления троса можно считать точку его отвода от приводимого электродвигателем через редуктор барабана (рисунок 2.1). Нижний конец троса непосредственно крепится к верхнему концу обезвешиваемого элемента (ОЭ) КБС в точке, которая совпадает с вертикалью, проведенной через центр масс элемента.



Рисунок 2.1 - Тросовая система обезвешивания элемента *i* -го крыла солнечной батареи.

ОЭ_i – i -й обезвешиваемый элемент КБС; Дв_{ix} – двигатель натяжения (вертикального перемещения); Рд_{ix} – редуктор привода вертикального канала подвеса ОЭ_i; БН_i – барабан для намотки троса; Тр_i – трос подвеса i -го элемента КБС; ДF_i – датчик силы обезвешивания (датчик силы вывески) i -го элемента КБС; ЦМ_i – центр масс i -го обезвешиваемого элемента.

Для математического описания троса подвеса как элемента комплексной системы, включающей КБС и стенд активного обезвешивания (СОА) примем следующие исходные допущения.

- Используемый трос равномерен по диаметру, изготовлен из однородного материала, обладает конечной жесткостью (упругостью) и под действием прилагаемых к нему сил способен растягиваться, изменяя при этом свою длину в соответствии с законом Гука [1].

-Пластичность троса при нагрузках, соответствующих весу обезвешиваемого элемента КБС, пренебрежимо мала и может в математическом описании не учитываться.

-Высота l_{dF} встроенного в тросовый подвес датчика силы обезвешивания (датчик силы вывески) намного меньше общей длины подвеса $l_i = O_{B_i} - O_{H_i}$. Пор этой причине будем считать растяжение тросового подвеса без учета встроенного в него датчика силы, т.е. однородным по всей длине l_i .

-Так как при испытаниях на создаваемом стенде процесс раскрытия КБС предполагает удержание тросов обезвешивания элементов КБС с высокой точностью в вертикальном положении, то будем полагать, что именно в таком вертикальном положении допустимо определять его вход-выходные свойства

-Общая длина *l_i* тросового подвеса при испытаниях механических устройств КБС на создаваемом стенде меняется очень незначительно, так как существенные изменения *l_i* фактически могут вызвать значительные изменения условий такого раскрытия КБС по сравнению с теми, при которых КБС раскрываются на космическом аппарате в космосе. Более того, существенные изменения *l_i* могут даже привести к поломке дорогостоящего КБС.

-В эксплуатируемом в настоящее время для испытаний механизмов раскрытия КБС стенде с пассивным обезвешиванием и каретками датчики сил обезвешивания элементов КБС размещают в нижней части тросовых подвесов, вероятно, исходя из соображений, что снимаемая с них информация используется лишь для оценивания точности обезвешивания при раскрытии КБС и передается на компьютер, размещаемый на рабочем столе испытателя. В стенде с активным обезвешиванием элементов КБС при его раскрытии информация с датчиков силы должна поступать не только испытателю, но и использоваться в следящих системах вертикальных каналов стенда обезвешивания. Если при этом контроллеры этих каналов будут расположены на используемых в стенде каретках, то предпочтительным может стать расположение датчиков сил в тросовых подвесах вблизи соответствующих кареток. По этой причине желательно математические вход-выходные отображения для тросовых подвесов характеризовать с учетом расположения датчиков сил в их различных частях.

-На каждом барабане БН_i имеется равномерно уложенный запас троса и его намотка и смотка не создают существенных изменений вращающих моментов на валах БH_i из-за изменений трения между витками троса.

-Отклонение тросов от вертикального положения, реально происходящие при раскрытии крыла солнечной батареи на стенде его обезвешивания будут учтены в последующем при формировании общих математических моделей стенда и испытуемого КБС.

Для упрощения приводимых ниже математических выражений индекс *i*, определяющий на их принадлежность к тросовой системе подвеса *i*-го обезвешиваемого элемента КБС не указывается.

В статических режимах работы в верхней точке подвеса *О*_в обезвешиваемого элемента КБС сила натяжения троса при его вертикальном

положении равна сумме веса (силы тяжести) $G_3 = m_3 \cdot g$ обезвешиваемого элемента ОЭ_i и веса G_T его поддерживающего троса Тр_i . При постоянном диаметре троса и однородном его исполнении статические усилия натяжения в любой его промежуточной точке будут однозначно зависеть от ее расстояния от конца троса и величины силя натяжения в его нижней точке. В данном случае принимаем эту силу постоянной и равной силе тяжести G_i .

Статическими и динамическими характеристиками троса как элемента системы активной обезвешивания (СОА), представляющими практический интерес, являются следующие две зависимости.

Зависимость силы натяжения в месте установления на тросе (в точке O_{A_i} установки датчика силы ДF_i от силы натяжения F_{B_i} в верхней точке крепления подвеса троса. Эта зависимость в линейном ее отображении будет определять передаточную функцию

$$W_{F_{ij}}(s) = \frac{F_i(s)}{F_{B_i}(s)}.$$
 (2.1)

Зависимость силы натяжения в месте крепления троса на обезвешиваемом элементе КБС от силы натяжения F_{B_i} в верхней точке крепления подвеса троса. В линейном ее отображении эта зависимость может быть описана передаточной функцией

$$W_{F_{ij}}(s) = \frac{F_{H_i}(s)}{F_{B_i}(s)}.$$
(2.2)

Зависимость удлинения Δl троса от силы натяжения в верхней точке его крепления и веса обезвешиваемого элемента КБС. Изменение прикладываемого к тросу веса обезвешиваемого элемента может иметь место при раскрытии боковых панелей КБС. Для основных элементов крыла солнечной батареи вес обезвешиваемых элементов можно считать постоянным.

Для определения указанных выше зависимостей определим вначале полное удлинение троса. Оно при выполнении условий закона Гука согласно [1] определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{F_{3} \cdot l}{E \cdot S} + \frac{\Psi \cdot l^{2}}{2E} = \Delta l_{F} + \Delta l_{K}$$
(2.3)

Здесь Е – модуль упругости каната;

S – площадь поперечного сечения каната;

ψ – удельный вес каната;

Δ*l*_{*F*} – упругая деформация (удлинение) каната под действием силы веса груза (обезвешиваемого элемента КБС);

 Δl_F – упругая деформация каната под действием собственного веса.

В случае обезвешивания элементов КБС масса троса существенно меньше массы обезвешиваемого элемента. Поэтому далее будем полагать, что $\Delta l_{\rm K}$ много меньше $\Delta l_{\rm F}$ и что $\Delta l_{\rm K} = 0$.

Из (2.1) следует, что величины $\frac{F_3}{E \cdot S}$ и $\frac{\psi \cdot l}{2E}$ – величины безразмерные.

Схема подвеса, соответствующая части тросового подвеса между датчиком силы и обезвешиваемым элементом КБС, представлена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 - Часть тросового подвеса ниже встроенного в него датчика

Удлинение нижней части троса в тросовом подвесе может быть определено по формуле:

$$\Delta z_2 = \frac{F_r \cdot z_{20}}{E \cdot S} \,. \tag{2.4}$$

При этом полагаем, что в (2.4)

*z*₂₀ – длина троса между датчиком силы ДС и обезвешиваемым элементов КБС в ненагруженном состоянии;

*F*_г - вес груза, в котором помимо веса обезвешиваемого элемента КБС.

Может быть при необходимости более точного расчета удлинения троса учтен и вес нижней части тросового подвеса (вес троса между датчиком силы и обезвешиваемым элементом КБС). То есть можно считать, что

$$F_{r} = \left(m_{9} + \psi \cdot S \cdot z_{20}\right) \cdot g \qquad (2.5)$$

Таким образом, в полностью обезвешенном состоянии элемента КБС в статическом режиме

$$z_{2} = z_{20} + \Delta z_{2} = z_{20} + z_{20} \cdot \frac{(m_{3} + \psi \cdot S \cdot z_{20}) \cdot g}{E \cdot S} = z_{20} \left[1 + \frac{g}{E \cdot S} (m_{3} + \psi \cdot S \cdot z_{20}) \right].$$
(2.6)

Это значение длины нижней части троса z_2 в идеальном в смысле обезвешивания элемента КБС. При этом идеальном состоянии полагаем, что обезвешиваемый элемент КБС не подвергается изгибу в вертикальной плоскости и не создает дополнительных сил сопротивления на трос его обезвешивания.

2.2 Описание части тросового подвеса между шпулей и датчиком силы в статическом режиме работы

Этой части тросового подвеса соответствует кинематическая схема, представленная на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 - Тросовый подвес между шпулей и датчиком силы

Вновь полагаем, что удлинение троса подвеса элемента КБС в верхней его части, обусловленное его собственным весом, пренебрежимо мало по сравнению с удлинением под действием веса обезвешиваемого элемента КБС и датчика силы. Вес этой части троса объединим при необходимости более точного анализа статики и динамики системы автоматической стабилизации натяжения троса с весом датчика силы.

С учетом выше указанного допущения удлинение верхней части троса подвеса будем определять в соответствии с (1) как и для нижней части троса по формуле, подобной (2), а именно:

$$\Delta z_1 = \frac{F_{\scriptscriptstyle B} \cdot z_{10}}{E \cdot S} \tag{2.7}$$

Здесь z_{10} – длина троса между датчиком силы ДС и точкой вывески обезвешиваемого элемента КБС на шпуле в ненагруженном состоянии; $F_{\rm B}$ – сила натяжения троса в точке его вывески $O_{\rm B}$, которая в статическом режиме работы САС натяжения троса при идеальной вывеске определяется как

$$F_{\rm B} = F_{\rm r} + F_{\rm AC} + \psi \cdot S \cdot z_{10} \cdot g . \qquad (2.8)$$

В формуле (8) использованы наряду с ранее определенными параметрами и величинами z_{10} , ψ , E, S, g, F_{r} также F_{dC} – вес датчика силы и верхней части троса обезвешивания.

Удлинение верхней части троса длиной z_1 с учетом (2.7) и (2.8) равно

$$\begin{split} \Delta z_1 &= \frac{z_{10}}{E \cdot S} \Big(F_r + F_{\text{JC}} + \psi \cdot S \cdot z_{10} \cdot g \Big) = \frac{z_{10}}{E \cdot S} \Big[F_{\text{JC}} + \Big(m_r + \psi \cdot S \cdot z_{20} \Big) \cdot g + \psi \cdot S \cdot z_{10} \cdot g \Big] = \\ z_{10} \frac{g}{E \cdot S} \Big[m_r + m_{\text{JC}} + \psi \cdot S \cdot z_0 \Big]. \end{split}$$

Здесь

$$z_0 = z_{10} + z_{20} \tag{2.10}$$

определяет общую длину тросового подвеса обезвешиваемого элемента КБС в ненагруженном состоянии.

Общее удлинение тросовой подвески в статическом режиме при идеальном обезвешивании элемента КБС

$$\Delta z = \Delta z_{1} + \Delta z_{2} = z_{10} \frac{g}{E \cdot S} \Big[m_{\rm r} + m_{\rm AC} + \psi \cdot S \cdot (z_{10} + z_{20}) \Big] + z_{20} \frac{g}{E \cdot S} (m_{\rm r} + \psi \cdot S \cdot z_{20}) = \frac{g}{E \cdot S} \Big\{ z_{10} \Big[m_{\rm r} + m_{\rm AC} + \psi \cdot S \cdot (z_{10} + z_{20}) \Big] + z_{20} (m_{\rm r} + \psi \cdot S \cdot z_{20}) \Big\}.$$

Данное удлинение троса размещается на шпуле, что обусловливает ее поворот под действием связанного с ней через редуктор серводвигателя (задатчика моментов) на угол α, величина которого определяется по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta z}{R_{\rm m}} \tag{2.12}$$

и измеряется в радианах.

Здесь $R_{\rm m}$ – радиус намотки троса на шпулю.

Создаваемый в рассматриваемом статическом режиме момент на валу шпули

$$M_{\rm III} = F_{\rm B} \cdot R_{\rm III} \tag{2.13}$$

Момент на валу серводвигателя без учета люфта и сил сухого трения в редукторе

$$M_{\rm cg} = \frac{1}{i_{\rm p}} \cdot M_{\rm m} \,. \tag{2.14}$$

Описанный выше статический режим работы тросового подвеса можно характеризовать статическими коэффициентами передачи. В частности, представляет интерес статический коэффициент передачи между весом F_r обезвешиваемого элемента КБС и удлинением троса подвеса Δz , а также статический коэффициент передачи между весом F_r обезвешиваемого элемента КБС и удлинением F_r обезвешиваемого элемента КБС и удлинением весом F_r обезвешиваемого элемента быть получены из (9) и (4) и соответственно равны:

$$K_{\Delta z, F_{\Gamma}} = \frac{\Delta z}{F_{\Gamma}} = \frac{z_{10} + z_{20}}{ES}, \frac{c^2}{\kappa^2};$$
(2.15)

$$K_{\Delta z_2, F_r} = \frac{\Delta z_2}{F_r} = \frac{z_{20}}{ES}, \frac{c^2}{\kappa^2}.$$
 (2.16)

Эти статические коэффициенты определены в предположении, что редуктор в САС натяжения троса используется в активном режиме работы серводвигателя и не имеет на своем выходном валу момента сухого трения, превышающего момент нагрузки на шпуле

$$M_{\rm m} = F_{\rm B} \cdot R_{\rm m}. \tag{2.17}$$

Если в САС НТ будет использован редуктор червячного типа с $M_{cr} > F_{B} \cdot R_{m}$, то статические коэффициенты тросового подвеса будут иными.

В этом случае идеальный статический режим работы тросового подвеса будет иметь место тогда, когда угол поворота вала шпули будет равен величине, определенной согласно (12), то есть будет создана вытяжка троса, равная Δz , указанная в (11).

2.3 Статика подвеса элемента крыла солнечной батареи при не

строго вертикальном положении троса его вывеска

Анализ таких статических режимов систем автоматического стабилизации натяжения тросов необходим для определения уровня ошибок в обезвешивании элементов КБС, а также для определения требований к точности работы следящих систем кареток, призванных поддерживать тросы подвеса элементов КБС в вертикальном положении при раскрытии крыла солнечной батареи.

Тросовый подвес элемента КБС в подобных случаях при неточном позиционировании каретки представлен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 -. Тросовый подвес элемента КБС при неточном позиционировании каретки

Полагаем, что каретка, на которой обеспечивается подвес элемента КБС, находится в произвольной позиции, не обеспечивающей строго вертикальное

положение троса. Ее положение таково, что точка вывески троса O_{BT} отклонена от требуемого положения O_{B} , когда трос строго вертикален. Полагаем также, что расположенная на каретке шпуля для троса отклонена по оси x на величину Δx и по оси y на величину Δy . Кроме того точка вывески троса O_{BT} элемента КБС находится не в плоскости x y (то есть в точке O_{BO}), а повернута на шпуле на угол α .

В таком случае точка $O_{\rm BO}$ отклонена в плоскости xy от идевльного положения точки вывески $O_{\rm B}$ на расстояние

$$\Delta_{xy} = \sqrt{\left(\Delta x\right)^2 + \left(\Delta y\right)^2} \,. \tag{2.18}$$

Угол β отклонения троса от вертикали определяется согласно рис. 7.7 из треугольника $O_{\Gamma}O_{B0}O_{B}$ и равен

$$\beta = \arcsin \frac{O_{\rm B}O_{\rm B0}}{O_{\rm \Gamma}O_{\rm B0}} = \arcsin \frac{\Delta_{xy}}{\sqrt{\left(\Delta_{xy}\right)^2 + \left(z_0\right)^2}},\tag{2.19}$$

где

$$z_0 = z_{10} + z_{20}. (2.20)$$

Согласно рисунку 4, угол отклонения точки $O_{\rm BO}$ от оси x

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y}{\Delta x} \,. \tag{2.21}$$

При работе следящих систем кареток стенда обезвешивания элементов КБС непосредственно указанные на рисунке 2.4 отклонения не измеряются, что естественно усложняет решение задачи обеспечения требуемой точности этих следящих систем.

Для определения отклонений каретки от строго вертикальной вывески троса обезвешивания элемента КБС используются датчики линейных перемещений троса вдоль оси x и ортогональной ей оси y, располагающиеся на выносной, закрепленной на каретке штанге, как показано на рисунке 2.5. Их удаление от точки $O_{\rm B}$ идеальной вывески элемента КБС на расстоянии $z_{\rm dx}$.



Рисунок 2.5 - Расположение датчика линейных перемещений троса вдоль оси *х*

Обозначим измеряемое датчиком линейных перемещений троса его отклонение от вертикали значение как Δx_{d} . В таком случае угол отклонения троса в плоскости, параллельной плоскости xz

$$\beta_x = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{\pi}}{z_{\pi}} = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x}{z_0}.$$
(2.22)

Отсюда следует, что

$$tg\beta_{x} = \frac{\Delta x_{\pi}}{z_{\pi}} = \frac{\Delta x}{z_{0}} \cdot .$$
(2.23)

Следовательно, информация об отклонении каретки от требуемого положения в плоскости *xz* может быть получена по расчетной формуле

$$\Delta x = \frac{z_{o}}{z_{\pi}} \cdot \Delta x_{\pi}$$
(2.24)

по исходной информации с датчика Дх, определяющего линейные отклонения троса от вертикали в плоскости *xz*.

Аналогично, отклонение точки вывески подвески от вертикали

$$\Delta y = \frac{z_0}{z_{\pi}} \cdot \Delta y_{\pi}, \qquad (2.25)$$

где Δy_{d} - измеренное отклонение троса от вертикали в точке установки датчика линейного смещения по оси *у*.

Проекция силы веса груза на трос

$$F_{\rm rT} = F_{\rm r} \cdot \cos\beta, \qquad (2.26)$$

Направление, перпендикулярное тросу,

$$F_{\rm FT} = F_{\rm F} \cdot \sin\beta \,. \tag{2.27}$$

При установке ДЛП на выносном кронштейне (трубе) ниже точки вывески *O*_в на расстоянии 1 метр и отклонении троса в рабочей зоне установки ДЛП на 12,5 мм, отклонение каретки от идеального ее положения, обеспечивающего строго вертикальное положение троса, будет равно

$$\Delta x = \frac{z_0}{z_{\rm d}} \cdot x_{\mu_{\rm max}} \, .$$

Если принять $z_0 = 5$ метров, то $\Delta x = \frac{5}{1} \cdot 12, 5 = 62, 5$ мм. При $z_0 = 4$ метра получаем, соответственно, $\Delta x = 50$ мм. В последнем случае это обуслов-ливает отклонение троса от вертикали на угол

$$\beta_x = \arcsin \frac{0.05}{4}$$

Следовательно, датчик силы будет измерять силу веса груза (элемента КБС)

$$F_{\Gamma\Gamma} = F_{\Gamma} \cdot \cos\beta,$$

т.е. с погрешностью. В частности, при $\Delta x = 50$ мм

$$F_{\Gamma\Gamma} = F_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = F_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,05}{4}\right)^2} = 0,999922.$$

Погрешность измерения силы веса груза из-за ошибки позиционирования каретки на Δx или такой же величины Δy при принятых выше значениях z_0

$$\Box F_{\Gamma_{\rm H}} = \frac{F_{\Gamma} - F_{\Gamma T}}{F_{\Gamma}} \cdot 100\% = 0,0078\%.$$

Подобная ошибка в информации о весе обезвешиваемого элемента КБС, обусловленная отклонением троса от вертикального положения, порождает ошибку в силе натяжения троса минимум того же уровня, если не предпринять никаких корректирующих ее мер.

При одновременном отклонении в положении каретки от идеального ее положения, обеспечивающем строго вертикального положения троса, по осям x и y на величины Δx и Δy , угол отклонения троса от вертикали β получаем измеряемую датчиком силы величину веса элемента КБС, равную

$$F_{\Gamma\Gamma} = F_{\Gamma} \cdot \cos\beta = F_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \sin^2\beta} = F_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{z_0}}.$$
 (2.28)

Отсюда следует, что при желании дополнительно повысить точность датчика силы веса обезвешиваемого элемента КБС показания датчика веса значение F_{rr} скорректировать, разделив его на соѕ β , т.е. на величину

$$\frac{1}{\cos\beta} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{z_0}}}.$$
 (2.29)

2.4 Описание кинематической схемы

В целом система обезвешивания должна обеспечивать отслеживание перемещения объекта в трех координатах, а также создавать момент компенсирующий внешнее усилие. На рисунке 2.6 представлен общий вил кинематической схемы. Перемещение по оси ОХ и оси ОУ обеспечивают каретки продольного и поперечного перемещения. Перемещение по оси OZ обеспечивает СВП (система вертикальных перемещений). Перемещение поперечной обеспечивается каретки за счет вращения шкива жесткозакрепленным с ремнем (клиноременная передача). При этом движущий момент передается по кинематической цепи электропривод – редуктор – шкив.



Рисунок 2.6 – кинематическая схема кареток стенда системы обезвешивания



Рисунок 2.7 – Общая конструкция поперечной каретки

Перемещение продольной каретки осуществляется таким же образом, только движущий момент передается по кинематической цепи электропривод – редуктор – передающие валы – шкив.



Рисунок 2.8 – Общая конструкция продольной каретки

Обезвешивание и перемещение по оси ОZ обеспечивается путем намотки троса на шпулю с должным ускорением компенсирующий внешнее усилие. При этом движущий момент передается по кинематической схеме электропривод – червячный редуктор – шпуля.



Рисунок 2.9 – Общая конструкция СВП

3 Теоритический анализ и разработка математических моделей

3.1 Математическое моделирование электропривода

Для обеспечения отслеживания перемещения по трем координатам используется один и тот же привод. В качестве исполнительного устройства принят сервопривод HF-KP43B фирмы Mitsubishi, включающий серводвигатель HF-KP43B и сервоусилитель MR-J3-40A/B/T.



Общая же структура сервопривода представлена на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 - Структура привода

Она включает серводвигатель, сервоусилитель и контроллер. Серводвигатель и сервоусилитель фактически представляют из себя единую комплектную систему, допускающую небольшие вариации, в основном в зависимости от требуемой мощности и сложности задач управления.

Выбран серводвигатель HF-KP43В мощностью 400Вт, представляющий из себя синхронную электрическую машину переменного тока, работающую в замкнутой системе с использованием датчика положения ротора. Восемнадцатибитный энкодер выдает 262144 импульсов на оборот, что позволяет добиться очень высокой точности в системах позиционирования. На рисунке 2 представлены графики изменения крутящего момента двигателя в зависимости от скорости.



Рисунок 3.2 - Характеристика крутящего момента

Как видно, до скорости 3000 об/мин крутящий момент имеет постоянное значение, не зависящее от частоты.

3.1.1Математическое описание самого привода

Вышеупомянутый привод относится к синхронным приводам с постоянными магнитами.

Запишем систему дифференциальных уравнений описывающую данный привод. В неподвижной системе координат запись уравнений базируется на втором законе Кирхгофа.

$$\begin{cases} u_{A} = R_{A}i_{A} + \frac{d\psi_{A}}{dt} \\ u_{B} = R_{B}i_{B} + \frac{d\psi_{B}}{dt} \\ u_{C} = R_{C}i_{C} + \frac{d\psi_{C}}{dt} \end{cases}$$

$$(3.1)$$

где

$$\psi_{A} = L_{A}i_{A} + \Phi_{0} \cos \omega t$$

$$\psi_{B} = L_{B}i_{B} + \Phi_{0} \cos(\omega t - 120)$$

$$\psi_{C} = L_{C}i_{C} + \Phi_{0} \cos(\omega t + 120)$$
(3.2)

Где R_{A}, R_{B}, R_{C} - сопротивление обмотки A, B, C соответственно, i_{A}, i_{B}, i_{C} - токи в обмотках A, B, C соответственно. Преобразуем систему уравнений (3.1) и (3.2) к уравнениям в пространственных векторах. Для этого умножим первое уравнение на $\frac{2}{3}$, второе

на $\frac{2}{3}\overline{a}$, третье на $\frac{2}{3}\overline{a}^2$, где $\overline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, в итоге получим, что

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \tag{3.3}$$

$$\psi_{s} = L_{s}\vec{i}_{s} + \Phi_{0}e^{j\omega t} = L_{s}\vec{i}_{s} + \vec{\Phi}_{0}$$
(3.4)

где u_s и ψ_s - суммарный вектор напряжения на статоре и потокосцепление.

Электромагнитный момент, развиваемый машины определяется следующим соотношением

$$M = \frac{3}{2} p * \operatorname{mod}\left(\overline{\Phi}_{0} \times \overline{i}_{s}\right)$$
(3.5)

где р – число пар полюсов машины

Уравнение равновесия моментов на валу машины, согласно второму закону Ньютона для вращательного движения примет вид:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H \tag{3.6}$$

Где $\omega_m = \frac{\omega}{p}$, где p - число пар полюсов;

J - момент инерции ротора;

 $M_{\rm \scriptscriptstyle H}$ - нагрузочный момент машины.

Выведем математическую модель во вращающейся системе координат Уравнение электрического равновесия примет вид.

$$u_{s} = R_{s}i_{s} + L_{s}\frac{d\bar{i}_{s}}{dt} + j\omega L_{s}\bar{i}_{s} + j\omega\overline{\Phi}_{0}$$
(3.7)



Рисунок 3.3 – расположение осей d и q относительно ротора синхронной машины

Разложим составляющие уравнения (3.7) по осям d и q, получим скалярное описание машины

$$\begin{cases} u_{d} = R_{s}i_{d} + L_{s}\frac{d\bar{i}_{q}}{dt} - \omega L_{s}\bar{i}_{q} \\ u_{q} = R_{s}i_{q} + L_{s}\frac{d\bar{i}_{d}}{dt} + \omega L_{s}\bar{i}_{d} + \omega \overline{\Phi}_{0} \\ M = \frac{3}{2}p\Phi_{0}i_{q} \\ J\frac{d\omega_{m}}{dt} = M - M_{H} \end{cases}$$

$$I_{b} = \frac{U_{b}}{R_{s}}, \ \omega_{b} = \frac{U_{b}}{\Phi_{0}}, M_{b} = \frac{3}{2}\Phi_{0}I_{b}$$

$$\omega = \omega_{m}p$$

$$(3.10)$$

где ω_m - угловая скорость вращения ротора;

ω - угловая скорость вращения магнитного поля статора;

*I*_{*b*} - номинальный ток;

*U*_{*b*} - номинальное напряжение.

Операторно – структурная схема приведена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Операторно – структурная схема модели сервопривода Смоделируем синхронный привод с параметрами изображенный в таблице 1, при задающем значении номинального напряжения, и единичном моменте нагрузки в момент времени 0,1 с.

	1		~	
$120\pi M$	I —	vanaktenuetuku	PLINNAUUATA	πημροπα
таолица Э.	T	Λαρακτορποτηκη	bbioparition	привода
		1 1	1	1 ' '

Модель серводвигателя		HF-KP43B
Модель сервоусилителя		MR-J3-40A/B/T
Напряжение питания, В		200
Номинальная частота напряжения		50
питания, Гц		
Длительный режим Номинальная выходная		0,4
	мощность [Вт]	
	Номинальный	1,3
	крутящий момент	
	[Нм]	
Максимальный крутящий момент [Нм]		3,8
Номинальная частота вращения		3000
[об/мин]		
Динамическая мощность [кВт/с]		38,6

Номинальный ток [А]	2,7
Сопротивление катушки возбуждения	73
при 20°С [Ом]	
Момент инерции, кг*м2	0,5e-4

Индуктивность обмотки в табличных данных не приведена, но исходя из справочных данных, в процессе моделирования двигателей такого типа и такой мощности примем ее 0,23 Гн. Остальные параметры модели рассчитаны по формулам 3.9, 3.10.



Рисунок 3.5 – Схема собранная в Simulink



Рисунок 3.5 – Переходные характеристики сервопривода

3.1.2 Режимы работы сервопривода

Сервоусилитель MR-J3-40A/B/T представляет собой устройство настраиваемое программным способом. В зависимости от типа задачи, можно настроить режим работы сервопривода (управление моментом, положением, скоростью), менять уставки характеризующее динамические свойства системы (время разгона, время торможения и др.), а также подключать опции, которые будут выполнять полезные вспомогательные функции (например, подавление вибрационных колебаний).

Для решения задач слежения, очевидно будет настроить сервопривод на режим управления скоростью.



Рисунок 3.6 - Операторно – структурная схема регулирования скоростью, с моделью сервопривода во вращающейся системе координат P_speed – регулятор скорости, PT_d, PT_q – регуляторы тока по оси d и q, 3задающее устройство

При этом в зависимости от настроек сервоусислителя базовая математическая модель привода будет модифицироваться. Например, в режиме управления положением автоматически включается внутренний контур обратной связи по положению вала, а если ограничивается крутящий момент, то необходимо ввести ограничения по моменту (току). Настройка регуляторов тока в сервоусилителе производится автоматически, посредством контура адаптации. Задающее устройство служит для задания времени нарастания скорости, а также времени торможения. Нелинейное звено с ограничением имитирует настройку задания ограничения крутящего момента.

В задаче активного обезвешивания элементов КБС необходимо перевести в режим управления моментом двигателя, при этом также базовая модель модифицируется в зависимости от настроек сервоусилителя. Структурная схема представлена на рисунке 7.



Рисунок 3.7 - Операторно – структурная схема регулирования момента, с моделью сервопривода во вращающейся системе координат РТ d, РТ q – регуляторы тока по оси d и q

Анализ работ [литература], что целесообразно представить СДПМ в виде апериодического звена второго порядка, по аналогии с двигателем постоянного тока. Упрощенная операторно – структурная схема представлена на рисунке 8. В этой модели принято следующие допущение: поскольку во время работы двигателя ток в обмотке d равен нулю, а сама обмотка не создает вращающего момента, то ею можно пренебречь.



Рисунок 3.8 – Упрощенная операторно –структурная схема СДПМ

На рисунках 3.10, 3.11, 3.12 показаны переходные процессы скорости, тока и момента соответственно при введении обратной связи по скорости с ПИ – регулятором СДПМ операторно структурная схема которого показана на рисунке 3.4 (желтый цвет), и СДПМ операторо – структурная схема которого показана на рисунке 8 (синий цвет) при номинальном напряжении и единичном моменте нагрузки приложенный в момент времени 0,1 с.



Рисунок 3.9 – Полная модель СДПМ с обратной связью по скорости



Рисунок 3.10 – Упрощенная модель СДПМ с обратной связью по скорости

Передаточные функции регуляторов получены с помощью инструмента Simulink Control Design (без перерегулирования и с минимальным временем переходного процесса) и имеют следующий вид:

Регулятор тока по оси d:

$$W_{perld} = \frac{13379}{s}$$

Регулятор скорости:

$$W_{perspeed} = \frac{39.7}{s}$$



Рисунок 3.10 – Переходные процессы скорости

∞, pa∂/c



Рисунок 3.11 – Переходные процессы момента



Рисунок 3.12 – Переходные процессы тока

Проанализировав графики переходных процессов, можно сделать вывод, что при составлении математической модели следящих систем и систем активного обезвешивания можно воспользоваться упрощенной моделью СДПМ.

На рисунке 3.13 представлена структурная схема контура регулирования скорости.



Рисунок 3.13 – Структурная схема регулирования скорости

В этой схеме блок 3 - имитирует настройку сервоусилителя характеризующее изменение времени разгона двигателя и его останова, блок насыщения – характеризует ограничения тока в обмотках.

На рисунке 14 показана структурная схема регулирования момента.



Рисунок 15 – Структурная схема регулирования момента

В этой схеме блок насыщения имитирует настройку сервоусилителя по ограничении выходной скорости.

Также нужно, что параметры внутренних ПИ, ПИД – регуляторов можно снять с помощью ПО для сервоусилителя. Индуктивность и сопротивление обмотки замеряем с помощью мультиметра.

3.1.3 Моделирование в режиме управления скоростью

Смоделируем режим управления по скорости, согласно операторно – структурной схеме на рис. 12. При задающем значении равным номинальной скорости и моменте нагрузки равным 0,1 Н*м, в момент времени 1,3 с.

При этом примем, что время разгона и торможения 0, а ток будет ограничиваться только по максимальному значению приведенному в таблице 1.



Рисунок 3.16 – Режим регулирования скорости



Рисунок 3.17 – Операторно – структурная схема собранная в Simulink

3.1.4 Моделирование в режиме управления момента

Смоделируем режим управления по моменту согласно операторно – структурной схеме на рис. 13. Проведем имитационное моделирование при задающем значении момента равным 1 Н*м, и возмущении равным 5 Н*м в момент времени 0,05с, при этом ограничение скорости находится на границе от-1200 об/с до 1200 об/с.



Рисунок 3.18 – Операторно – структурная схема собранная в Simulink



Рисунок 3.19 – График переходного процесса скорости



Рисунок 3.20 – График переходного процесса момента

3.2 Математическое описание электромеханической электромеханических систем перемещения объектов

Для получения математической модели систем перемещения объектов необходимо вывести уравнения, которые отобразят связь между физическими параметрами элементов системы. Для достижения этой цели используются несколько подходов, рассмотрим их.

-Применения уравнения Лагранжа второго рода. Для применения этих уравнений необходимо выполнить следующие действия:

а) определить число степеней свободы системы

б) выбрать обобщенные координаты

в) выбрать действующие силы и моменты

г) найти выражения для кинетической и потенциальной энергии через обобщённые координаты

д) записать систему уравнений Лагранжа второго рода

- Применения уравнений по второму закону Ньютона. Для применения этого метода необходимо выполнить следующие действия.

а) определить все силы действующие в системе и расставить соответствующие векторы

 б) записать уравнения согласно второму закону Ньютона в векторной форме

 в) записать уравнения согласно второму закону Ньютона в скалярной форме, спроецировав его составляющие на оси выбранной системы координат

Анализ поставленных задач показал, что при составлении математической модели целесообразно применять уравнения по второму закону Ньютона.

3.3 Математическое моделирование системы вертикальных перемещений (вертикального канала).

При составлении математической модели приняты следующие допущения:

- Трение в редукторе и троса о подвижные части отсутствует.
- Растяжение и сжатие троса подчиняется закону Гука.
- Весом каната в данных условиях можно пренебречь
- Коэффициент затухания не зависит от длины троса

Рассмотрим систему из одного груза весящего на тросе (Рисунок 3.21).



Рисунок 3.21 -. Груз весящий на тросе

Запишем систему уравнений по второму закону Ньютона описывающие динамику груза:

$$m\vec{a}_1 = m\vec{g} + \vec{T}_2 + k(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$$
 (3.11)

$$T_2 = Q(x_1 - x_2) \tag{3.12}$$

Для датчика силы:

$$m_{\partial}\vec{a}_{2} = m_{\partial}\vec{g} + \vec{T}_{2}' + \vec{T}_{1}$$
 (3.13)

$$\vec{T}_{2}' = \vec{T}_{2} + k(\dot{x}_{1} - \dot{x}_{2})$$
 (3.14)

$$\vec{T}_1 = Q'(x_{um} - x_1) + k'(\dot{x}_{um} - \dot{x}_1)$$
(3.15)

Где *x*₁ - координата датчика;

*x*₂ - координата груза;

*x*_{un} - наращиваемая линейная координата шпули;

т - масса груза;

т₀ - масса датчика;

Q' - жесткость троса между датчиком и шпулей;

Q - жёсткость троса между датчиком и грузом;

k - коэффициент внутреннего вязкого трения;

 \vec{a}_2 - ускорение датчика;

 \vec{a}_1 - ускорение груза.

Для преобразования вращательного движения шпули в поступательное движение обезвешиваемого груза необходимо рассчитать радиус приведения.

$$\rho_{CBII} = \frac{D_{un}}{2i_{peo}} \tag{3.16}$$

Где $\rho_{\scriptscriptstyle CBIT}$ - приведенный радиус системы вертикальных перемещений;

*D*_{um} - диаметр шпули;

*i*_{*ped*} - коэффициент передачи червячного редуктора;

Приведенный момент инерции к валу ротора двигателя определяется следующим соотношением

$$J_{p} = J_{pom} + J_{u} + J_{uk} / i^{2}_{peo} + J_{M} + J_{um} / i^{2}_{peo}$$
(3.17)

Где J_{u} - момент инерции червяка;

*J*_м - момент инерции передающей вращение муфты;

*J*_{чк} - момент инерции червячного колеса;

*J*_{ит} - момент инерции шпули;

*J*_{*pom*} - момент инерции ротора.

Уравнение равновесия моментов на валу ротора привода по второму закону Ньютона для вращательного движения примет вид

$$J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_o - M_{T_1}$$
(3.18)

Где ω_p - угловая скорость вращения ротора;

*М*_{*о*} - двигательный момент;

 M_{T_1} - момент развиваемый упругой силой T_1 ;

Жёсткость троса от датчика до панели будем считать постоянной величиной причём основной вклад будет вносить участок от датчика до шпули.

Точка подвеса панели будет совершать вращательное движение, так как горизонтальная составляющая перемещения панели не влияет на величину сил вертикального канала, то в уравнениях (3.11) и (3.14) под ускорениями понимается проекция тангенциального ускорения точки подвеса на вертикальную ось.

Для достижения эффекта обезвешивания необходимо чтобы привод создавал момент компенсирующий момент внешнего усилия.



Рисунок 3.22 – Операторно – структурная схема системы вертикальных перемещений

3.4 Математическое моделирование системы горизонтальных перемещений

Принцип осуществления отслеживания горизонтальных перемещений по ос ОХ и ОУ является идентичным. По этой причине математические модели этих систем будут идентичны. Рассмотрим построение математической модели системы по оси ОУ.

При построении математической модели были приняты следующие допущения

- Волновым движением деформации в упругих звеньях можно пренебречь, так как время переходного процесса во много раз больше времени распространения волны упругой деформации.
- Деформация упругих звеньев линейна и подчиняется закону Гука, т. е.
 не выходит за пределы упругости.
- Дискретные массы не подвержены деформации, т. е. принимаются абсолютно жесткими.
- Силы или моменты, действующие в расчетной системе, приложены в месте сосредоточенных масс.

Анализ показал, что в системе действуют следующие силы и моменты:

- 1) моменты развиваемые электродвигателями;
- 2) сила, вызывающее раскрытие спицы;
- 3) силы трения в механизмах СПО;
- 4) силы внутреннего вязкого трения упругих элементов.



Рисунок 3.23 - Кинематическая схема следящей системы

На рисунке 3.23 показана кинематическая схема следящей системы активного обезвешивания панели или как ее называют система горизонтальных перемещений (СГП).

Для записи уравнений необходимо разделить систему на характерные участки.

Участок Двигатель - каретка.

Запишем уравнения по 2-му закону Ньютона для участка двигатель – каретка

$$\frac{1}{J_{p}p} \left(M_{\partial} - M_{\kappa \partial} \right) = \omega_{\partial} - \omega_{\kappa}$$
(3.19)

Где ω₀ - угловая скорость вращения барабана редуктора;

*ω*_к - приведённая угловая скорость каретки;

*М*_{*о*} - момент создаваемый двигателем;

*M*_{кд} - момент упруго – диссипативных сил на участке «двигатель - каретка», появляется из ща упругих свойств ремня в клиноременной передачи;

*J*_{*p*} - приведенный момент инерции ротора двигателя.

Сила отвечающая за упруго – диссипативные свойства ремня имеет вид:

$$F_{\kappa\partial} = b_{\partial\kappa} (x_{\partial} - x_{k}) + c_{\partial\kappa} (\dot{x}_{\partial} - \dot{x}_{k})$$
(3.20)

Где x_{o} , x_{k} - координата барабана редуктора и каретки, $b_{o\kappa}$ - коэффициент жесткости ремня на участке двигатель – каретка, $c_{o\kappa}$ - коэффициент вязкого трения на участке двигатель – каретка.

Либо перейдя к угловым величинам

$$M_{\kappa\partial} = b_{\partial\kappa} (\varphi_{\partial} - \varphi_{k}) + c_{\partial\kappa} (\dot{\varphi}_{\partial} - \dot{\varphi}_{k})$$
(3.21)

Участок каретка – объект.

Рассмотрим отдельно систему из груза весящего на тросе, если каретка передвинется на расстояние x_k , тут же возникнет момент который стремиться уравновесить систему.

$$M_{ynp} = m_o g \sin(\varphi_k - \varphi_{cn}) \rho_{CFII}$$
(3.22)

Где φ_o - перемещение панели (объекта) пересчитанное в угловых величинах, ρ_{CIII} - приведенный радиус системы горизонтальных перемещений

$$\rho_{C\Gamma\Pi} = \frac{D_{\delta p}}{2i_p} \tag{3.23}$$

D_{бр} - диаметр барабана шкива, i_p - коэффициент передачи редуктора Тогда сила отвечающая за упруго – диссипативные свойства участка будет иметь вид

$$F_{\kappa o} = m_o g \sin(\varphi_k - \varphi_{cn}) + b_{\kappa o} (\dot{x}_k - \dot{x}_o)$$
(3.24)

*b*_{*ko}</sub> - коэффициент вязкого трения на участке</sub>*

Сила действующая на каретку:

$$F_{\kappa o} - F_{\kappa \partial} = m_k \ddot{x}_k \tag{3.25}$$

В итоге скорость перемещения объекта

$$\dot{x}_o = \frac{1}{m_o p} \left(F_o - F_{\kappa o} \right) \tag{3.26}$$

Где *F*_o - сила создаваемая для раскрытия панели (горизонтальная составляющая).

Приведенный момент инерции к ротору двигателя определяется следующим соотношением

$$J_{p} = J_{ped} + J_{pom} + 2 \cdot (J_{e} + J_{u} + J_{M}) / i_{ped}^{2}$$
(3.27)

Где *J*_{*ped*} - момент инерции редуктора;

*J*_{pom} - момент инерции ротора;

J_в - момент инерции одного вала;

 $J_{\scriptscriptstyle \! \! \textit{\tiny ull}}$ - момент инерции шкива;

*J*_м - момент инерции муфты.

На рисунке 3.24 представлена операторно – структурная схема следящей системы.



Рисунок 3.24 – Операторно – структурная схема следящей системы

3.5 Определение параметров характеризующие упруго диссипативные свойства элементов следящей системы и системы активного обезвешивания экспериментальным методом

Коэффициенты внутреннего вязкого трения и коэффициенты жесткости упругих элементов системы определяется исходя из проведения ряда экспериментов. Коэффициенты затухания и жесткости определяется исходя из снятых осциллограмм усилия, на рисунке 3.25 показана типовая осциллограмма колебаний при ступенчатом воздействии.



Рисунок 3.25 – Типовая осциллограмма изменения усилия Частота затухающих колебаний определяется из соотношения:

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2 \tag{3.28}$$

Где ω_0 - собственная частота колебаний системы, δ - коэффициент затухания системы.

С другой стороны

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_0}} \tag{3.29}$$

Где *k* - жесткость упругого элемента;

*m*₀ - масса колеблющегося груза.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{3.30}$$

Где Т - период снятых колебаний

$$\delta = \frac{\lambda}{T} \tag{3.31}$$

Где λ - логарифмический декремент затухания

С другой стороны логарифмический декремент затухания определяется из соотношения

$$\lambda = \ln\left(\frac{F_1}{F_2}\right) \tag{3.32}$$

Где *F*₁, *F*₂ - амплитуды двух соседних колебаний

Решая совместно (3.28), (3.29), (3.30), (3.31), (3.32).

$$k = m \left(\frac{4\pi^2 + \lambda^2}{T^2}\right) \tag{3.33}$$

Коэффициент внутреннего вязкого трения определяется из соотношения

$$b = 2m\frac{\lambda}{T}k = 2\frac{kT\lambda}{4\pi^2 + \lambda^2}$$
(3.34)

Ввиду отсутствия возможности проведения экспериментов числовые значения были взяты из источника [].

4 Имитационное моделирование и синтез регуляторов

После вывода уравнений математической модели необходимо провести синтез регуляторов и имитационное моделирование в ППП Matlab приложение Simulink.

4.1 Имитационное моделирование системы обезвешивания и синтез регуляторов (системы вертикальных перемещений)

Для осуществления системы обезвешивания необходимо создать компенсирующий внешний усилие момент, придавая грузу соответствующие ускорение.

Структурная схема системы автоматического натяжения троса (САУ НТ) представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 -. Структурная схема САУ НТ

В качестве привода для активной системы обезвешивания используется синхронный привод с постоянными магнитами (СДПМ). Это сервопривод, который состоит из сервоусилителя и непосредственно самого привода, имеет внутренние обратные связи и может работать в режиме управления моментом, скорости или положения. Касательно вертикального канала обезвешивания нас интересует регулирование момента. Блок «Модель системы «Лебедка – датчик - груз» содержит в себе операторно – структурную схему представленную на рисунке 22

Смоделируем систему согласно параметрам представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Численные параметры

Наименование параметра	Численное значение
Коэффициент редукции	<i>i</i> =10
Диаметр шпули	d = 80 MM $= 0,08$ M

Наименование параметра	Численное значение
Момент инерции шпули	$J_{_{\scriptscriptstyle M}}=0,0002041\kappa \cdot M^2$
Момент инерции червяка	$J_{u} = 0,0000159\kappa \varepsilon \cdot m^2$
Момент инерции червячного	$J_{_{\rm VK}} = 0,0003\kappa_{\mathcal{E}} \cdot M^2$
колеса	
Момент инерции ротора	$J_{pom} = 0.5 \cdot 10^{-4} \kappa_{\mathcal{E}} \cdot M^2$
Момент инерции муфты	$J_{M} = 75 \cdot 10^{-7} \kappa z \cdot M^2$
Радиус приведения	$ \rho_{CBII} = 0,004 \text{M} $
Масса датчика	<i>m</i> _∂ =0,7 кг
Коэффициент жёсткости	Q = 10000 H / M
между датчиком и грузом	
Коэффициент жёсткости	Q' = 5000 H / M
между грузом и шпулей	
Коэффициент внутреннего	k' =100 <i>Hc</i> /м
вязкого трения между датчиком и	
грузом	
Коэффициент внутреннего	k' = 20Hc/m
вязкого трения между грузом и	
шпулей	

В качестве регулятора применим ПИД – регулятор, для его синтеза используем инструмент Simulink Control Design. В приложении XX представлена операторно – структурная схема собранная в Simulink для имитационного моделирования. На рисунке 4.2 представлен график переходного процесса снятый с датчика усилия при обезвешиваемой массе 5 кг и добавке равной 1 кг (что соответствует силе 9,8 H) в момент времени 5 с.



Рисунок 4.2 – Переходной процесс изменения усилия снятый с

датчика

4.2 Имитационное моделирование следящей системы и синтез регуляторов (системы горизонтальных перемещений)

Система горизонтальных перемещений предназначена для отслеживания перемещений объекта по оси Ох и Оу достаточно высокой точностью.

На рисунке 4.3 представлена структурная схема САР следящей системы.



Рисунок 4.3 – Структурная схема следящей системы

Перемещение каретки осуществляется посредством клиноременной передачи. Приводом также является синхронный привод с постоянными магнитами марки HF-KP43B. Причем в этом случае нас интересует режим регулирования скорости. Блок «Модель системы «Каретка - груз» содержит в себе операторно – структурную схему представленную на рисунке 24.

Смоделируем систему с параметрами изображенные в таблице 3.

Таблица 3 – Численные значения

Наименование параметра	Численное значение
Коэффициент редукции	<i>i</i> =10
Диаметр шкива	d = 60 мм $= 0,06$ м
Момент инерции шкива	$J_{_{\scriptscriptstyle M}} = 5.8 \cdot 10^{-6} \kappa_{\mathcal{Z}} \cdot \mathcal{M}^2$
Момент инерции вала	$J_{_{G}} = 713,55 \cdot 10^{-6} \kappa_{\mathcal{C}} \cdot M^{2}$
Момент инерции редуктора	$J_{ped} = 0.5 \cdot 10^{-4} \kappa z \cdot m^2$
Момент инерции ротора	$J_{pom} = 0.5 \cdot 10^{-4} \kappa_{\mathcal{C}} \cdot M^2$
Момент инерции муфты	$J_{_{\mathcal{M}}} = 75 \cdot 10^{-7} \kappa \varepsilon \cdot M^2$
Радиус приведения	$ \rho_{CIII} = 0,003 \text{M} $

Наименование параметра	Численное значение
Масса каретки	<i>m</i> _к =150 кг
Масса панели	40 кг
Коэффициент жёсткости	Q = 235510H / M
ремня	
Коэффициент внутреннего	k' = 287 <i>Hc</i> / м
вязкого трения ремня	
Коэффициент внутреннего	3,1
вязкого трения при качении груза	

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p = \frac{10}{s} + 4000s$$

Операторно – структурная схема собранная в Simulink представлена на в приложении XX. График изменения угла представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.5 – Переходной процесс изменения угла

Проведем исследование динамики переходного процесса при различных k_p (пропорциональном), k_i (интегральном), k_d (дифференциальном) коэффициентах регулятора.

Эксперимент №1

 $k_p = 1000, k_i = 10, k_d = 4000$

График переходного процесса имеет вид



Рисунок 4.6 – График переходного процесса изменения угла

Как видно время переходного процесса увеличилось

Эксперимент №2

 $k_p = 0, k_i = 20000, k_d = 4000$





Как видно из графика время переходного процесса уменьшилось, точность увеличилась.

Эксперимент №3

 $k_p = 0, k_i = 40000, k_d = 4000$



Рисунок 4.8 – График переходного процесса изменения угла

Как видно время переходного процесса увеличилось, точность увеличилась

Проанализировав графики переходных процессов можно сделать вывод, что система обладает большой колебательностью. Так как основной вклад в колебательность системы вносит интегральная составляющая регулятора, то было принято решение синтезировать регулятор с переменной И- составляющей значение которой формируется по нечеткому закону. На рисунке 4.9 представлена структурная схема такой системы.



Рисунок 4.9 – Структурная схема системы с настройкой параметров по нечеткому алгоритму

График переходного процесса изменения угла представлен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – График переходного процесса угла при нечётком алгоритме настройки регулятора

4.3 Техническая реализация систем автоматического регулирования.

В качестве электропривода вертикальных и горизонтальных перемещений был применен синхронный привод с постоянными магнитами HF-KP43B фирмы Mitsubishi, включающий серводвигатель HF-KP43B и сервоусилитель MR-J3-40A/B/T. Сервоусилитель имеет USB – интерфейс для передачи данных на ПК и конфигурации.



Рисунок 4.11 – Серводвигатель HF-КР43В



Рисунок 4.12 - Сервоусилитель MR-J3-40A/B/T Регулятор (ПИД – регулятор) реализован на базе промышленного контроллера Mitsubishi



Рисунок 4.13 – Программируемый контроллер Mitsubishi FX3U Программируемые контроллеры FX3U Mitsubishi обладают следующими особенностями:

— использование современного высокоскоростного процессора,

- увеличенный (64 000 шагов программы) объём ЕЕРROM, что является вполне достаточным для применения даже очень сложных вычислительных алгоритмов,
- возможность подключения текстового ЖК дисплея FX3U-7DM (опция),
- наличие встроенных высокоскоростных счётчиков: 6 на 100кГц и 2 на 10кГц, что позволяет справиться с небольшими задачами позиционирования без применения специальных модулей,
- контроллер укомплектован батареей резервного питания FX3U-32BL, которая обеспечивает работу часов и сохранность данных при отключении питания.
- программируемые контроллеры сертифицированы и имеют свидетельство об утверждении типа средств измерений.

В проекте СОА, разрабатываемом, предусмотрено использование датчиков линейных перемещений (ДЛП) типа GS 754В компании Leuze electronic GmbH. Их рабочий диапазон измеряемых линейных перемещений составляет 0–25мм. При их работе в составе следящих систем кареток необходимо измерять смещение троса относительно его среднего положения в рабочем поле датчика линейных перемещений. Следовательно, входвыходная характеристика этого датчика без учета его зоны нечувствительности будет иметь вид, представленный на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14 - Вход-выходная характеристика датчика линейных перемещений

Следовательно, максимально измеряемое датчиком линейных перемещений (ДЛП) перемещение троса $x_{\mu_{max}} = \pm 12,5$ мм.



Рисунок 4.15 – Внешний вид датчика отклонения угла GS 754В В целом система сбора и обработки информации представляет собой класическую трехуровневую систему АСУТП. Вся информация с нижнего уровня поступает на АРМ оператора. На АРМ оператор может полноценно управлять исполнительным механизмами.

В приложении XX представлена трехуровневая система сбора и обработки информации.

Заключение

В данной работе на основании выполненных теоритических исследований решена актуальная задача математического моделирования стенда системы обезвешивания крупногабаритных трансформируемых объектов с целью создания условий максимально приближенных к условиям невесомости.

Получены следующие результаты, имеющие научное и практическое значение:

- Математическая модель следящей системы стенда активной системы обезвешивания, для дальнейшего проведения экспериментов изучения динамики переходных процессов;
- Математическая модель системы вертикальных перемещений обеспечивающая компенсацию внешних, с целью достижения эффекта обезвешивания;
- Исследован характер динамики переходных процессов следящей системы, с целью синтеза регулятора обеспечивающий меньшую колебательность.

Список публикаций

1. Математическое моделирование синхронного привода с постоянными магнитами в составе электромеханической силокомпенсирующей системы [Электронный ресурс] // XIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»: Томск, 22-23 апреля 2016. - Томск: ТПУ.,

2. Исследование динамических свойств вертикального канала активной силокомпенсирующий системы [Электронный ресурс] // IV Всероссийский молодежный форум с международным участием «Инженерия для освоения космоса»: Томск, 2016 г. С. 45-48.