

## Реферат

Выпускная квалификационная работа имеет 142 страницы, 69 рисунков, 13 таблиц, 19 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: рефлектор антенны, механизм выдвижения мачты, алгоритм обезвешивания спиц, активная система обезвешивания, следящая система каретки.

Объектом исследования является стенд для раскрытия рефлектора антенны с восьмью спицами диаметром 8,6 метров. Цель работы – моделирование наземных испытаний рефлекторов антенн космического аппарата (КА) на стенде с активной системой обезвешивания.

В процессе исследования проводился анализ существующих способов обезвешивания элементов конструкций КА, разрабатывался алгоритм обезвешивания спицы, определялись кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при раскрытии рефлектора антенны КА, разрабатывалась модель системы раскрытия спицы.

Рефлектор антенны КА, принятый для рассмотрения имеет диаметр 8,6 м, состоит из 8 спиц массой 4,7 кг, мачты массой 10 кг, электродвигателя марки ДБ25-11-6.

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. В будущем планируется произвести испытания для дальнейшей настройки модели.

## Оглавление

Введение.....	4
1. Обзор способов имитации невесомости для наземных испытаний космических аппаратов.....	8
1.1 Классификация способов обезвешивания.....	8
1.1.1 Способы пассивного обезвешивания.....	9
1.1.2 Способы пассивно – активного обезвешивания.....	11
1.1.3 Способы активного обезвешивания.....	15
2. Объект и методы исследования.....	25
2.1 Описание конструкции рефлектора с диаметром 8,6 метров и процесса его раскрытия.....	25
2.2 Методы исследования.....	28
3. Алгоритмы управления для активных систем обезвешивания одностержневых спиц рефлекторов антенн космических аппаратов при наземных испытаниях их механических устройств.....	31
3.1. Постановка задач обезвешивания рефлекторов антенн для наземных испытаний.....	31
3.2. Алгоритм обезвешивания спицы при креплении троса подвеса в ее центре масс и на подвижной каретке.....	34
3.3. Алгоритм обезвешивания спицы при креплении троса подвеса не в ее центре масс и на подвижной каретке.....	38
3.4. Выбор варианта вывески спиц рефлекторов антенн для разрабатываемого стенда.....	42
3.5. Вариант крепления троса вывески на спице в ее центре масс с использованием сдвоенного его исполнения.....	44
4. Определение основных кинематических зависимостей разрабатываемой математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн.....	48

4.1 Исследование кинематической зависимости углов механизма раскрытия спиц от выдвижения мачты .....	48
4.2 Определение зависимости силы тяги приложенной к мачте от угла раскрытия спицы и выдвижения мачты.....	53
5. Математическое моделирование процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн .....	57
5.1. Структура математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн.....	57
5.2. Математическое моделирование процессов раскрытия спиц рефлектора антенны в земных условиях.....	57
5.3 Графики, полученные в результате моделирования раскрытия спиц рефлектора антенны в земных условиях.....	71
5.4 Математическое моделирование процессов раскрытия спиц рефлекторов антенн в условиях имитации невесомости.....	73
5.5 Графики, полученные в результате моделирования раскрытия спиц рефлектора антенны в условиях имитации невесомости.....	81
5.6 Рекомендации по настройке математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн.....	84
Заключение .....	87
Список публикаций студента .....	89
Список использованных источников .....	90
Приложение А Детализация модели системы раскрытия спицы рефлектора антенны в Simulink MatLab .....	93
Приложение Б Control algorithms for active systems of weightlessness imitation of single-rod spokes of the spacecraft's reflector – type parasitics at the ground testing their mechanical arrangements.....	99

## **Введение**

**Актуальность.** В условиях современных тенденций улучшения качества мобильной (в том числе телефонной) связи, а также возможности обеспечения ею труднодоступных участков нашей планеты, стало особенно актуальным размещение на борту космических аппаратов (КА) антенн связи больших диаметров, что позволило бы увеличить ее чувствительность к принимаемым электромагнитным сигналам.

В связи с этим в настоящее время множество предприятий космической отрасли ведут интенсивные научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы, направленные на разработку бортовых антенн КА все больших диаметров. Однако увеличение диаметра накладывает дополнительные сложности на процесс их испытаний. В большинстве случаев, использованные ранее пассивные способы обезвешивания составных частей рефлекторов антенн, по мере увеличения диаметра антенн КА становятся все менее эффективными, так как вызывают, так называемый, эффект «присоединенных масс», при которых приводы всех входящих в состав рефлектора механизмов одновременно с линейными и/или угловыми перемещениями приводимых ими частей рефлектора перемещают и средства, входящие в системы их обезвешивания.

В связи с этим особое значение приобретает исследование, направленное на создание способов и устройств, позволяющих производить наземные испытания раскрытия антенн КА больших диаметров в искусственно созданных условиях имитирующих невесомость с возможностью снижения эффекта «присоединенных масс».

**Целью диссертационной работы** является моделирование наземных испытаний рефлекторов антенн КА на стенде с активной системой обезвешивания.

## **Основные задачи исследований**

На основе анализа существующих способов обезвешивания элементов конструкций КА определены следующие задачи диссертационной работы:

- произвести анализ существующих способов обезвешивания элементов конструкций КА;
- разработать алгоритм обезвешивания спицы рефлектора антенны КА;
- определить кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при раскрытии рефлектора антенны КА;
- определить зависимость силы тяги спицы от угла ее раскрытия;
- разработать математическую модель системы раскрытия спицы рефлектора антенны КА.

#### **Методы решения задач**

Поставленные задачи решались путем теоретических и экспериментальных исследований. При решении задач использовались современные компьютерные технологии, в частности пакеты MatLab R2015a, Autodesk Inventor Professional 2015, AutoCAD 2016.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработан алгоритм обезвешивания спицы рефлектора антенны КА с использованием тросового подвеса с регулируемой силой его натяжения и следящей системой каретки;
- получены формулы определяющие кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от выдвигания мачты и от других углов при раскрытии рефлектора антенны КА;
- получены формулы зависимости силы тяги приложенной к спице от угла раскрытия спицы рефлектора антенна КА;
- разработана математическая модель системы раскрытия спицы рефлектора антенны КА.

**На защиту выносятся** следующие основные научные результаты и положения диссертации:

- алгоритм обезвешивания спицы рефлектора антенны КА;
- формулы для определения зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при раскрытии рефлектора антенны КА;
- формула зависимости силы тяги спицы от угла раскрытия спицы рефлектора антенны КА;
- математическая модель системы раскрытия спицы рефлектора антенны КА;
- Результаты экспериментальных исследований полученной системы обезвешивания.

**Практическая ценность** результатов диссертационной работы заключается в возможности использования смоделированной системы раскрытия спиц рефлектора антенны КА при создании испытательного стенда раскрытия рефлектора антенны с активной системой обезвешивания, что позволит производить испытания в условиях более точного приближения к условиям невесомости.

**Реализация работы.** Данная диссертационная работа выполнена в рамках хозяйственной 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 (КТИ НП СО РАН), который в свою очередь является по контракту № 37-14 от 01.07.2014 г. исполнителем ОКР для Генерального заказчика – АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), реализующего Государственный контракт на выполнение ОКР «Разработка технологии создания прецизионных размеростабильных конструкций из полимерных композиционных материалов и высокоточной имитации условий невесомости при комплексных проверках функционирования крупногабаритных трансформируемых конструкций космических аппаратов».

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы докладывались:

на VIII Фестивале Microsoft в ТПУ. XIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», г. Томск, 22-23 марта 2016 г.;

на XXI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016», г. Томск, 25-30 апреля 2016 г.;

на IV Всероссийском молодежном форуме с международным участием "Инженерия для освоения космоса", г. Томск, 2016 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 3 научные работы.

## **1. Обзор способов имитации невесомости для наземных испытаний космических аппаратов**

### **1.1 Классификация способов обезвешивания**

Для успешного раскрытия рефлекторов антенн в космическом пространстве, предварительно необходимо произвести наземные испытания в искусственно созданных условиях имитации невесомости. Чтобы приблизиться к условиям невесомости необходимо максимально обезвесить тем или иным способом каждую из подвижных частей испытуемого изделия. Для этих целей, на практике широко используются специальные стенды.

Выбор системы обезвешивания определяется кинематикой раскрывающегося звена, динамическими его характеристиками, требуемой точностью обезвешивания, числом испытываемых изделий и др.

В соответствии с принципом действия возможны различные системы обезвешивания:

- на воздушных опорах;
- на электромагнитной подвеске;
- на аэростатической подвеске;
- в гидросреде;
- в самолетах, летящих по специальной траектории;

механические с применением тросов, противовесов, пружин, роликов, рычагов, шарниров и др.

На сегодняшний день известны различные способы имитации невесомости, используемые при наземных испытаниях механических устройств крупногабаритных трансформируемых изделий (КТИ). В зависимости от способов формирования сил обезвешивания все эти способы можно разделить на пассивные, пассивно-активные и активные. В активных системах обезвешивание достигается посредством регулирования момента создаваемым электроприводом, в пассивных – посредством использования противовесов, в



комбинированных (пассивно-активных) - сочетаются свойства первых двух систем.

### 1.1.1 Способы пассивного обезвешивания

На рисунке 1.1 представлена схема статической системы обезвешивания с вертикальной точкой приложения усилия. Она предназначена для отработки трансформирующихся систем типа «слоистой» платформы при условии, что усилие обезвешивания не меняется.

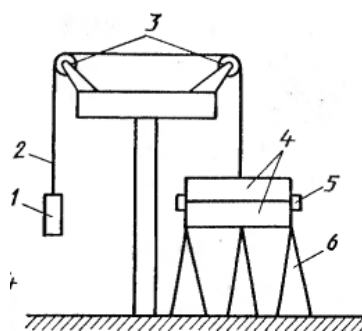


Рисунок 1.1 – Схема статического обезвешивания с верхним приложением нагрузки

1 — противовес; 2 — трос; 3 — блок; 4 — платформа; 5 — замок; 6 — подставка

Для случая, когда изменяется усилие обезвешивания и известен закон его изменения, схема обезвешивания представлена на рисунке 1.2.

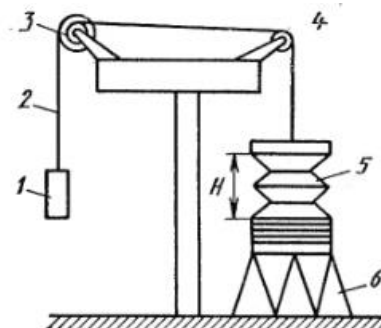


Рисунок 1.2 – Схема обезвешивания при изменении усилия

1 — противовес; 2 — трос; 3 — улитка; 4 — блок; 5 — трансформирующийся кожух; 6 — подставка

В качестве примера объекта испытания выбран трансформирующийся кожух 5 с торцевыми шпангоутами, требующий малых скоростей раскрытия. Воспроизведение заданного закона изменения усилия обезвешивания от величины  $H$  производится с помощью улитки 3, представляющей собой барабан переменного диаметра.

Схема обезвешивания в горизонтальной плоскости (рис. 1.3) применяется в тех случаях, когда есть возможность поднять точку крепления системы достаточно высоко, чтобы уменьшить усилия в узлах вращения.

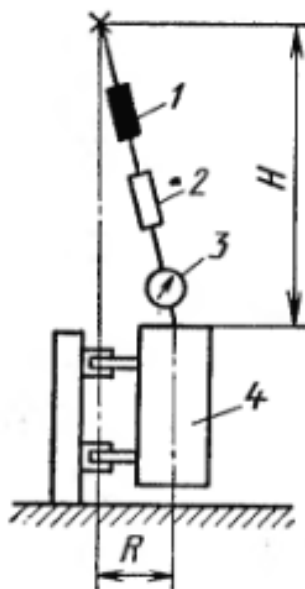


Рисунок 1.3 – Схема обезвешивания в горизонтальной плоскости

1 — упругий элемент; 2 — тандер; 3 — динамометр; 4 — узел

Упругий элемент 1 предназначен для компенсации неточностей установки системы, тандер предназначен для регулировки и настройки системы. Критерием минимума погрешности усилия обезвешивания является условие  $H \gg R$  [1].

Помимо представленных способов обезвешивания с использованием пассивных методов обезвешивания в качестве основных элементов стенов

используются тросы, противовесы, пружины, ролики, рычаги, шарниры и многое другое.

Использование пассивных способов обезвешивания позволяет создавать простые механические системы обезвешивания. Они достаточно универсальны, легко перенастраиваемы, надежны в условиях изменения температур и давления, но имеют малую точность обезвешивания за счет эффекта «присоединенных масс» и неприменимы в сложных многозвенных конструкциях, в частности, относительно рефлекторов антенн КА больших диаметров.

### **1.1.2 Способы пассивно – активного обезвешивания**

Одной из известных идей стенда с использованием комбинированного способа обезвешивания, является стенд для моделирования невесомости двухзвенных механизмов (рис. 1.4), изложенный в патенте СССР № 1467418, суть которого заключается в повышении точности моделирования невесомости за счет исключения влияния сил трения в элементах подвесок стенда и синхронного перемещения каждой подвески в нужном направлении.

Работа стенда основана на использовании системы противовесов, кареток и электродвигателей, работающих по определенным алгоритмам. Под действием своих приводов 11 звенья 9 и 10 испытываемого механизма перемещаются в вертикальной плоскости, а их массы уравновешены противовесом 20. При появлении в ветвях панелей гибких элементов 6 горизонтальных составляющих от усилий нагрузки начинают перемещаться соответствующие каретки 3 и связанные с ними через гибкие элементы 12 противовесы 27 и 28. Стенд снабжен двумя уравнительными механизмами, включающими в себя каждый электродвигатель 13 с редуктором 14, установленный на выходном валу редуктора 14 регулировочный шкив 15 и фрикционную муфту 16 с пружиной 17 и гайкой 18. Одни концы основных гибких элементов 6 закреплены на основании 1, а другие их концы через

дополнительный подвижный блок 19, закрепленный на первом противовесе 20, закреплены на барабане 21, установленном на основании 1. Электродвигатели 13 через регулировочные шкивы и фрикционные муфты компенсируют усилия перемещения кареток 3 по направляющим 2 и гибких элементов 6 по шкивам 5 и подвижным блокам 7. Один электродвигатель управляется от системы управления приводами 11, а второй – от устройства управления, установленного на одной из кареток 3 и реагирующего на усилие натяжения гибких элементов 6. [2]

Таким образом, компенсация сил трения в подвижных элементах стенда осуществляется благодаря приложенным компенсирующим силам созданным электродвигателями через шкивы 15 и муфты 16, работа приводов 11 протекает при имитации невесомости звеньев 9 и 10.

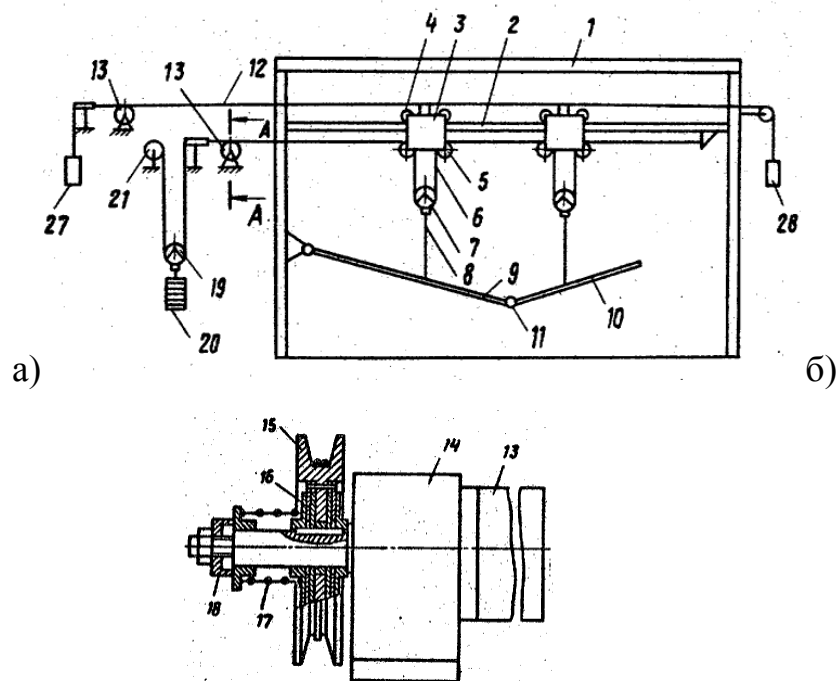


Рисунок 1.4 - Стенд для моделирования невесомости двухзвенных механизмов: а) вид сбоку; б) сечение А – А.

Недостатками предложенного способа является сложность конструкции, невозможность подсоединиться к центру масс подвижного звена, при некоторых вариантах его конструктивных особенностей, значительная погрешность имитации невесомости, невозможность измерения характеристик

обезвешиваемой конструкции (моментов сопротивления, весовой составляющей, скорости перемещения подвижных элементов конструкции, предназначенных для работы в состоянии невесомости в наземных условиях).

К другому изобретению, предназначенному для испытания конструкций, совершающих в процессе функционирования сложные пространственные перемещения, в условиях имитации невесомости относится стенд (рис. 1.5), описание которого содержится в патенте СССР № 1722946.

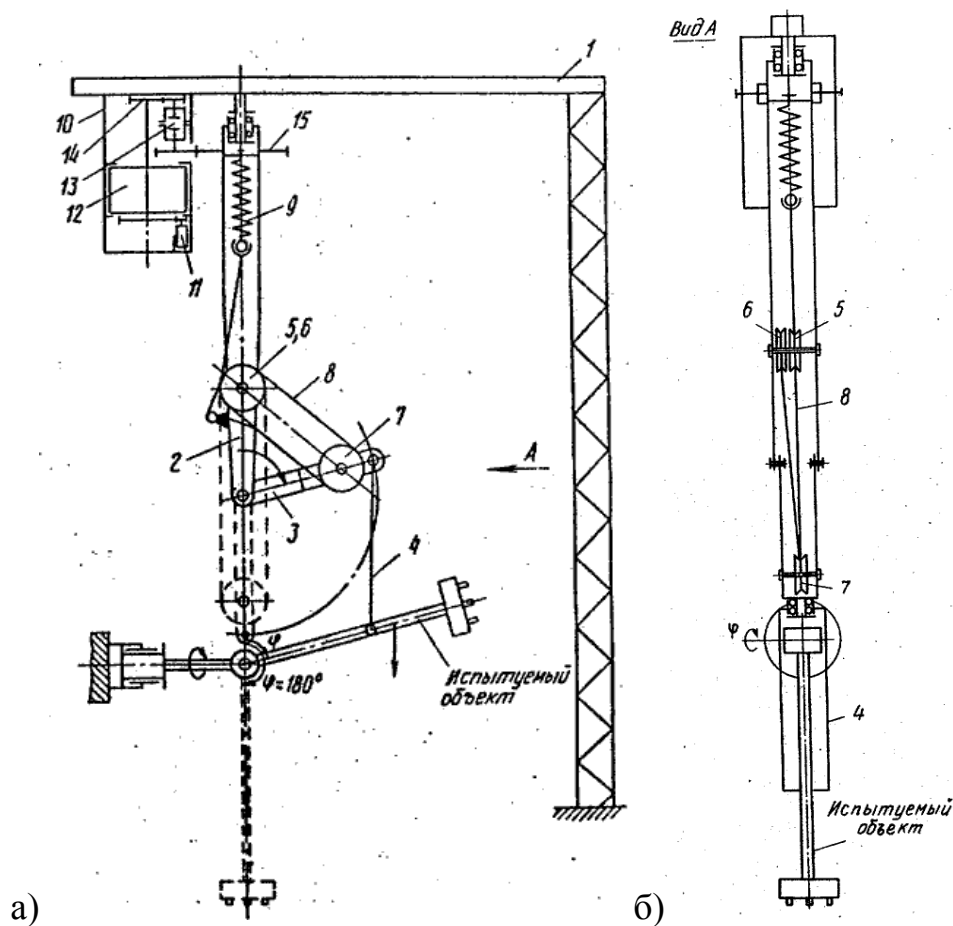


Рисунок 1.5 - Стенд имитатора пониженной гравитации а) общий вид исполнительного механизма имитатора пониженной гравитации; б) вид А

Устройство работает следующим образом: испытуемый объект соединен с подвеской 4 исполнительного механизма посредством шарнирного узла. При этом упругий элемент 9, взаимодействуя с испытуемым объектом через трособлочную систему 5-8, вилку 3 и подвеску 4, обеспечивает обезвешивание испытуемого объекта.

В процессе испытания объект испытаний может совершать перемещение в вертикальной плоскости на угол  $\varphi$  и вокруг своей продольной оси на угол  $\theta$ .

Исполнительный механизм обеспечивает отслеживание пространственного положения объекта испытаний за счет поворота вилки 3 синхронно с перемещениями объекта в вертикальной плоскости на угол  $\varphi$ .

При углах  $\varphi$ , отличных от  $180^\circ$ , момент сопротивления вращению на шестерне 15 превышает допустимый крутящий момент на муфте 13, в результате чего муфта 13 размыкает кинематическую связь между шестерней 14 редуктора 12 и шестерней 15, жестко закрепленной на вилке 2, и вращение на вилку 2 не передается.

При перемещении объекта на угол  $\varphi$ , близкий к  $180^\circ$ , момент сопротивления вращению на шестерне 15 становится близким к нулю. Срабатывает муфта 13, восстанавливается кинематическая связь между шестернями 14 и 15, в результате чего усилие от привода 11 передается на вилки 2 и 3, которые приводятся во вращение относительно неподвижной подвески 4.

При  $\varphi = 180^\circ$  объект и связанная с ним посредством подвески 4 вилка 3 начинают перемещаться. Одновременно прекращается вращение вилок 2 и 3, так как этому препятствует подвеска 4, связанная с объектом, возрастает момент сопротивления вращению на шестерне 15, срабатывает муфта 13 и разрывает кинематическую связь между шестерней 14 и 15. Таким образом происходит переход через положение «мертвой точки». [3]

Преимуществом данного стенда является более расширенные функциональные возможности исполнительного механизма за счет обеспечения возможности испытания объектов, совершающих в процессе функционирования сложные пространственные перемещения, благодаря описанному выше способу. Недостатком данного стенда является сложность конструкции, а также еще большее ее усложнение по мере увеличения составных элементов обвешиваемых конструкций, относительно невысокая точность обвешивания.

Устройство обезвешивания элементов, представленное на рис. 1.6, содержит в себе шестистепенное газостатическое устройство подвеса и следящую систему по поддержанию заданного давления газа. Требуемое усилие обезвешивания создается посредством газа под давлением. Основным минусом - сложность конструкции и эксплуатации, обусловленные применением газа под регулируемым давлением.

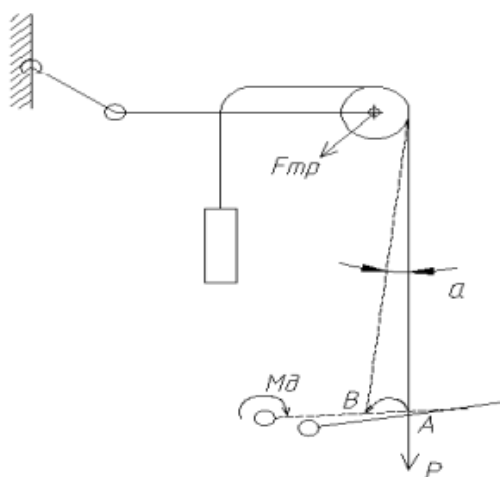


Рисунок 1.6 - Устройство обезвешивания элементов

### 1.1.3 Способы активного обезвешивания

Указанные недостатки для стенда моделирования невесомости двухзвенных механизмов (рис. 1.4) стремятся исправить в следующем изобретении, описанном в патенте RU 2334970, в частности, упрощения конструкции и определении характеристик подвижных элементов конструкций, предназначенных для работы в состоянии невесомости в наземных условиях. Конструкция изобретения приведена на рисунке 1.7.

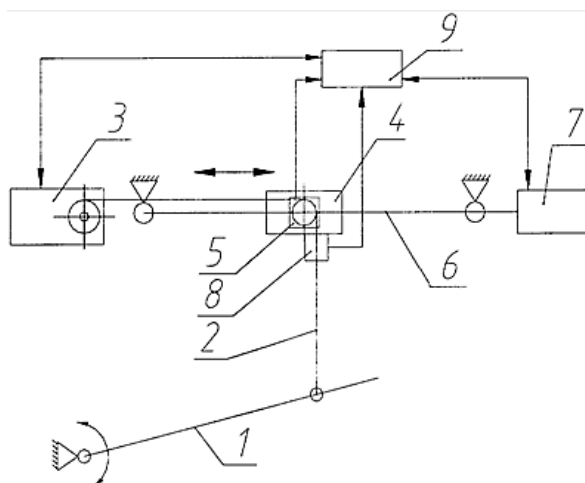


Рисунок 1.7 - Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией элементов

Предлагаемое устройство имитации невесомости работает следующим образом: блок управления 9 формирует алгоритм работы устройства имитации невесомости путем снятия значения величин весовой составляющей в точках траектории движения обезвешиваемого элемента (при незадействованном механизме, приводящем в действие обезвешиваемый элемент). Снятие весовой составляющей осуществляется с нагрузочной ячейки 5 при работе электропривода вертикального перемещения 3. Одновременно электропривод горизонтального перемещения 7 каретки 4 по команде с датчика угла 8 поддерживает вертикальное положение гибкой связи 2. После формирования значений величин весовой составляющей приводится в действие механизм движения обезвешиваемого элемента 1. Данные с нагрузочной ячейки 5 при задействованном механизме движения обезвешиваемого элемента 1 сравниваются в БУ 9 со значениями величин весовой составляющей при незадействованном механизме движения обезвешиваемого элемента 1 и БУ 9 выдает команду о величине скорости на электропривод вертикального перемещения 3. Одновременно электропривод горизонтального перемещения 7 по команде с датчика угла 8 на блок управления 9 сообщает каретке 4 поступательное движение.



Устройство имитации невесомости ориентировано на различные скорости движения обезвешиваемого элемента 1, а также имеет возможность удерживать элемент (конструкцию в целом) в обезвешенном состоянии.

Устройство имитации невесомости позволяет имитировать процесс движения элементов конструкции, имеющих разную скорость движения в обезвешенном состоянии, путем установки системы на каждый отдельный элемент конструкции. Взаимодействие системы обеспечивается через блок управления 9. [4]

На более развитом этапе развития систем обезвешивания КТИ производится разработка следящих систем на основе интеллектуальных электроприводов.

Одним из таких примеров стенда активного обезвешивания является мобильная система имитации невесомости для крупногабаритных космических аппаратов, разработанная в Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева.

Система включает в себя блок управления 1 и необходимое количество модулей обезвешивания (для примера на рис. 1.8 показана система с двумя модулями 2 и 3).

Каждый модуль 2 или 3 включает в себя два сервопривода (M1 и M2). Первый сервопривод 4 крепится к стене или к потолку. На рабочий вал 6 сервопривода 4 крепится поворотная консоль 7, на конце которой расположен второй сервопривод 5, в свою очередь, имеющий собственную поворотную консоль 8, на конце которой находится грузозахватный орган 9. Грузозахватный орган 9 состоит из весоизмерительной ячейки 10, соединенной с платформой 11, на которой установлен электропривод 12, редуктор которого связан с катушкой 13, на которой намотан строп 14. Строп идет на тросоукладчик 15, на котором установлен датчик угла 16, определяющий его вертикальное отклонение, и датчик расхода стропа 17.

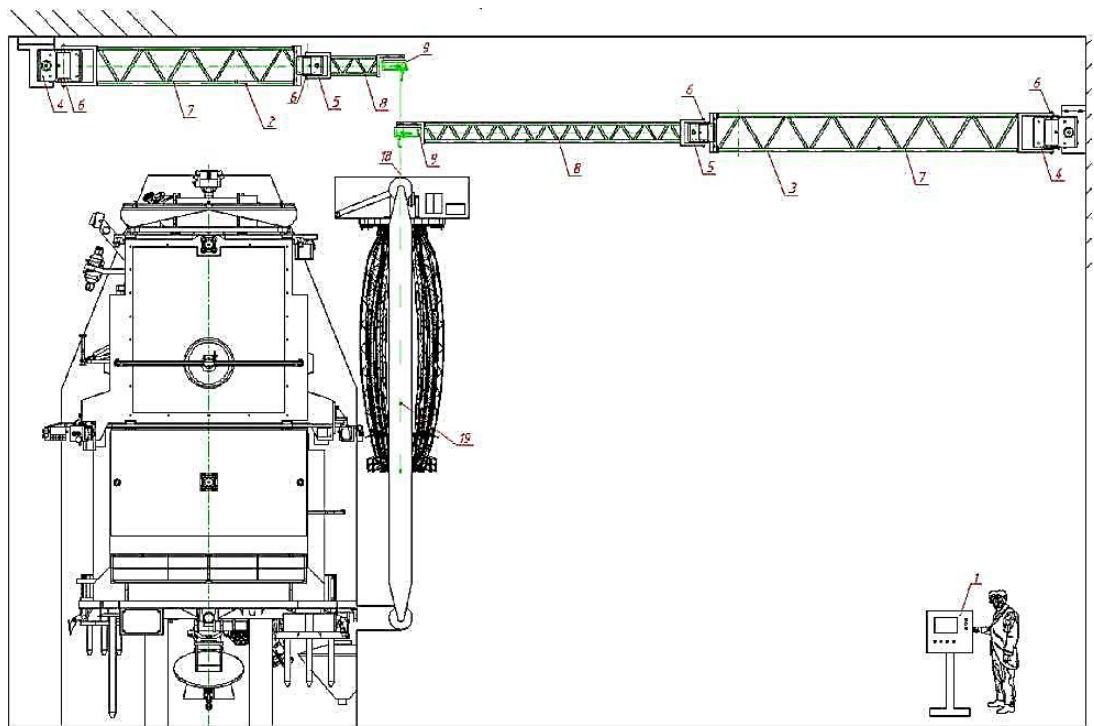


Рисунок 1.8 - Исходное положение

Система имитации невесомости работает следующим образом:

- перед процессом раскрытия устанавливается необходимое количество модулей 2 и 3, соответствующее количеству точек приложения усилия обезвешивания, гибкие связи 18 грузозахватного органа 9 присоединяются к элементам обезвешиваемого объекта 19, находящегося в сложенном положении (рис. 1.8);

- при раскрытии элементы обезвешиваемого объекта 19 (рис. 1.9 и 1.10) начинают поступательное движение, система имитации невесомости по сигналам с датчиков угла 16 осуществляет позиционирование модулей 2 и 3 таким образом, чтобы гибкие связи 18 были вертикальные по отношению к объекту обезвешивания 19 вплоть до конечного расположения системы (рис. 1.4.4).

Сигналы с датчика угла 16 поступают в систему управления 1, в которой задаются алгоритм и динамические характеристики (скорости, ускорения) сервоприводов (M1 и M2) с целью поддержания вертикальности гибкой связи 18.

Система имитации невесомости позволяет обезвешивать элементы конструкции, имеющие разную скорость движения в процессе раскрытия, так как работает в следящем режиме по сигналам с датчиков угла отклонения 16, и каждый модуль 2 и 3 системы работает на «свой» элемент обезвешиваемой конструкции 19. Таким образом, имеется возможность удерживать весь объект в целом в обезвешенном состоянии. Так, в приведенном примере (рис. 1.11) модуль 2 проходит прямолинейную траекторию от точки А до точки В, а модуль 3 проходит сложную траекторию от точки А до точки С и далее - до точки D. [5]

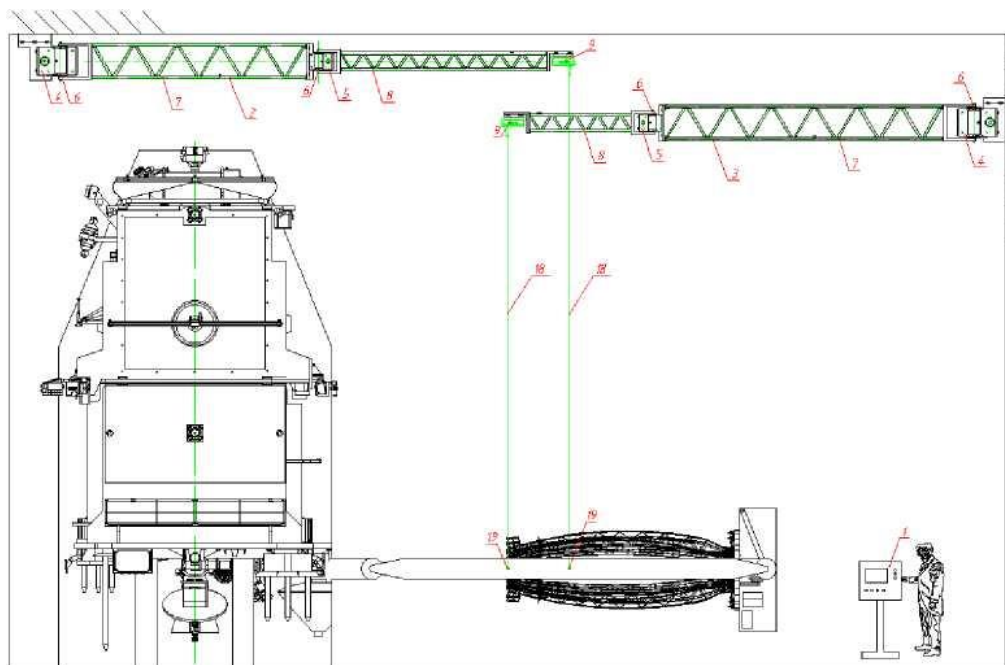


Рисунок 1.9 - Промежуточное положение

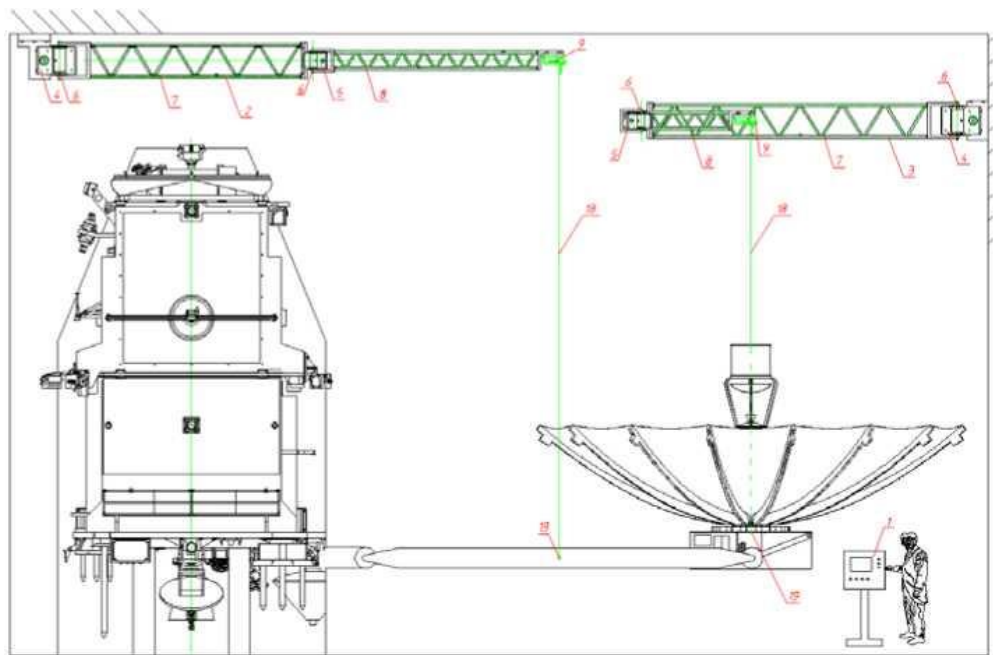


Рисунок 1.10 - Конечное положение

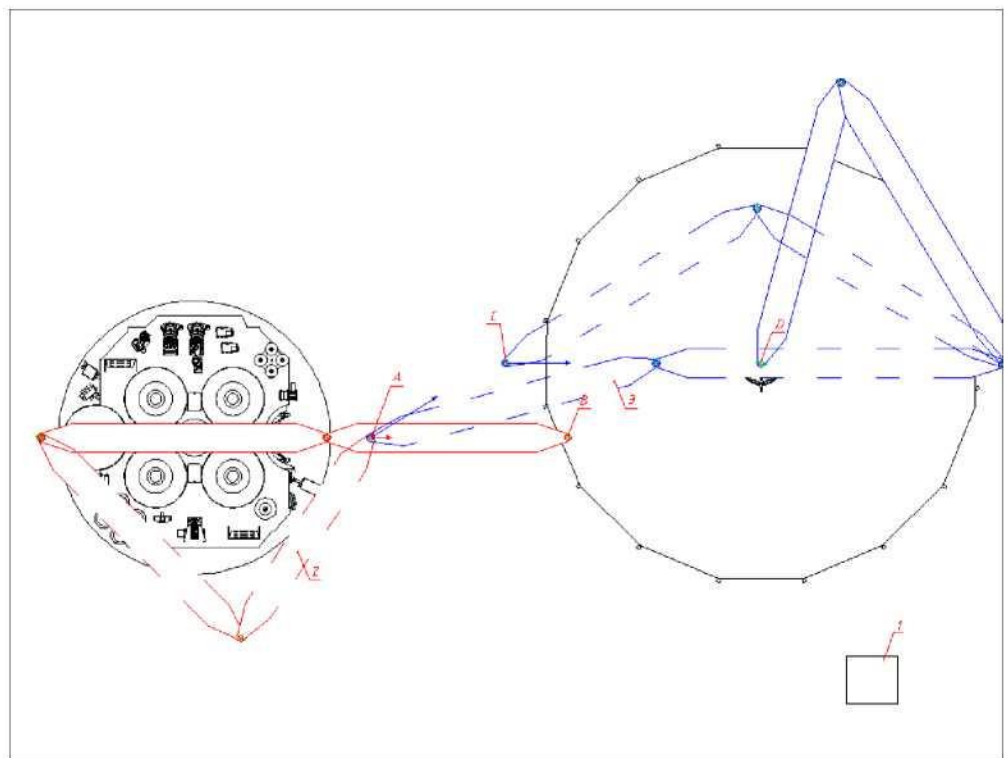


Рисунок 1.11 - Вид сверху

Преимуществами данной системы имитации невесомости является возможность использования ее для значительных перемещений обезвешиваемых подвижных элементов конструкций крупногабаритных

космических аппаратов, также модульный принцип построения позволяет адаптировать систему под различные характеристики конкретного объекта (исходя из его геометрии и необходимого числа точек приложения усилия), помимо этого конструкция позволяет расположить точки приложения усилия компактно, когда первоначально элементы обезвешиваемого объекта находятся в сложенном положении и по мере раскрытия и перемещения в рабочее состояние перемещать эти точки по самостоятельным траекториям с разными скоростями в следящем режиме, по мере раскрытия составных частей объекта обезвешивания. Устройство имитации невесомости позволяет имитировать процесс движения элементов конструкции имеющих разную скорость движения (если это необходимо) в обезвешенном состоянии путем установки модуля «обезвешивания» на каждый отдельный элемент конструкции.

Помимо представленных способов имитации невесомости для обезвешивания деталей КТИ существует и ряд других, реализуемых с использованием воздушных опор [6], разгрузки рефлектора антенны с помощью воздушных шаров [7], использовании специальной конструкции, в состав которой входят воздушные подшипники [8] и другие способы обезвешивания элементов КТИ.

Система активного обезвешивания спиц рефлекторов антенн на разрабатываемом в рамках ОКР «Кемчуг» стенде должна решать задачу работоспособности привода раскрытия антенны, чтобы он не испытывал дополнительных моментов, создаваемых силами тяжести ее раскрываемых элементов, на всех этапах их работы от начала раскрытия до его окончания и придания антенне ее рабочей формы. Таким образом, система активного обезвешивания раскрываемых на стенде антенн должна решать задачу обеспечения инвариантности системы управления приводом раскрытия антенны к весу раскрываемых элементов.

При решении задачи обезвешивания спиц рефлектора антенны, следует рассматривать каждую однозвенную спицу как балку, шарнирно закрепленную своим одним концом на неподвижном основании и подвешенную на тросе.

Стенд, обеспечивающий обезвешивание спиц рефлектора антенн, работает следующим образом.

Каждая из спиц рефлектора антенны должна быть подвешена тросом к каретке, которая перемещается над рефлектором на горизонтальных направляющих в плоскости раскрытия спиц, причем работа каретки должна производиться в режиме слежения за вертикальным положением троса подвеса спиц. Необходимые для обезвешивания спиц силы натяжения в тросах их подвеса в стенде должны обеспечивать системы автоматического управления натяжением тросов, которые с этой целью должны с помощью электроприводов не только поддерживать требуемые силы натяжения тросов, но и наматывать на катушки освобождающиеся части тросов подвеса, размещенные на каретках.

Задачу обеспечения инвариантности работы привода раскрытия спицы от ее веса можно представить следующим образом:

$$M_A(G) + M_A(F) = 0, \quad (1.1)$$

$$F_A(G) + F_A(F) = 0. \quad (1.2)$$

В равенствах (1.1) и (1.2) использованы следующие обозначения:

$G$  – вектор силы веса обезвешиваемой спицы;

$F$  – вектор силы натяжения троса обезвешивания;

$M_A(G)$  – момент, создаваемый вектором силы веса спицы относительно оси  $A$  ее разворота при раскрытии;

$M_A(F)$  – момент, создаваемый вектором силы натяжения троса относительно оси  $A$  ее разворота при раскрытии;

$F_A(G)$  – вектор силы давления на шарнирное сочленение спицы с основанием, создаваемый вектором силы веса спицы;

$F_A(F)$  – вектор силы давления на шарнирное сочленение спицы с основанием, создаваемый вектором силы натяжения троса.

Система активного обезвешивания стенда должна обеспечивать выполнение этих равенств за счет генерации такой силы натяжения троса  $F(t)$  антенны, при которой выполняются данные равенства.

В рамках решения этой задачи было предложено два варианта алгоритма реализации обезвешивания спицы: при креплении троса подвеса в ее центре масс и на подвижной каретке (рис. 1.12, а) и при креплении троса подвеса не в центре масс спицы и на подвижной каретке (рис. 1.12, б).

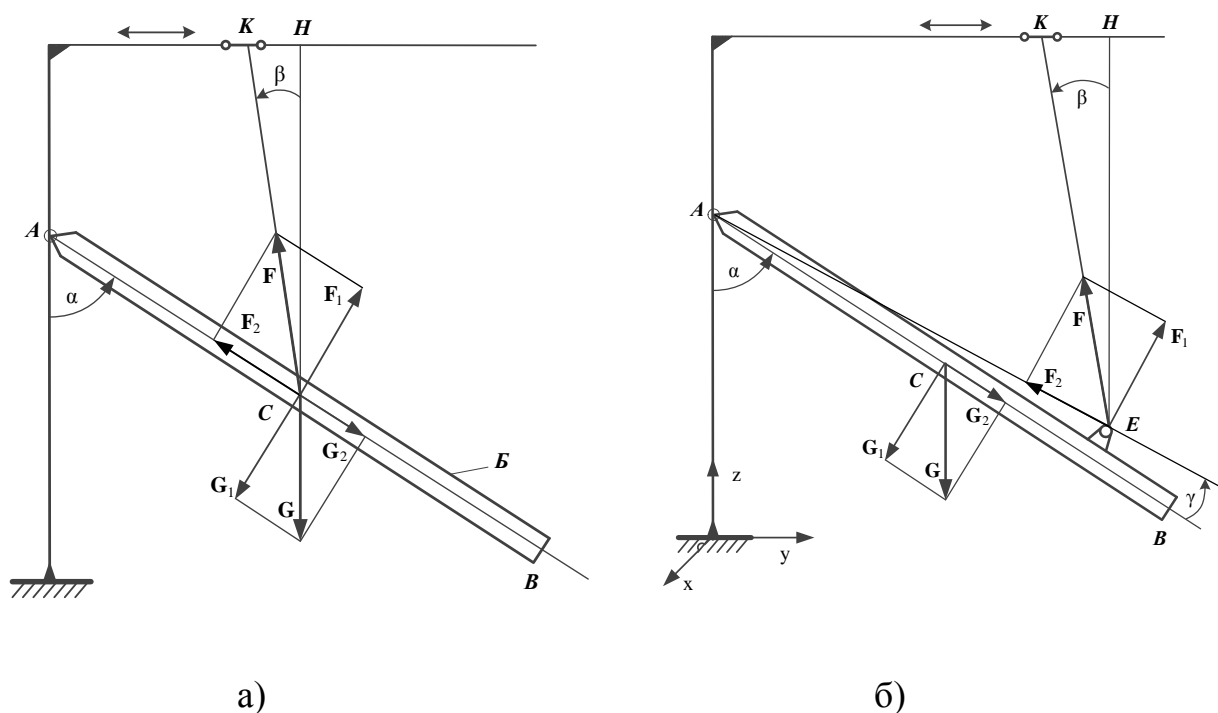


Рисунок 1.12 - Схема обезвешивания балки, шарнирно закрепленной одним из своих концов на жестком основании: а) при совпадении ее центра масс и точки подвеса троса; б) при несовпадении ее центра масс и точки подвеса троса

Реализация алгоритма обезвешивания на аналитическом уровне при реализации первого варианта обезвешивания балки при креплении подвеса троса в ее центре масс решается достаточно просто, но при практической реализации возникает ряд проблем, связанных с невозможностью подсоединения подвеса троса к центру масс спицы, так как при полной сборке антенны трудно будет определить местоположение центра масс спицы и поддерживаемой ею части сетеполотна отражателя. К тому же, он будет менять

свое положение в зависимости от угла раскрытия  $\alpha$  спицы. Поэтому целесообразней применить второй вариант схемы обезвешивания балки, при несовпадении ее центра масс и точки подвеса троса, в этом случае, алгоритм обезвешивания спицы будет более сложен, но практически реализуем благодаря отсутствию необходимости крепления подвеса троса в центре масс спицы.

Таким образом в результате проведенного анализа существующих способов обезвешивания элементов конструкций КТИ космических аппаратов, было установлено, что в большинстве случаев, использованные ранее пассивные способы обезвешивания составных частей рефлекторов антенн, по мере увеличения диаметра антенн КА становятся все менее эффективными, так как вызывают, так называемый, эффект «присоединенных масс», при которых приводы всех входящих в состав рефлектора механизмов одновременно с линейными и/или угловыми перемещениями приводимых ими частей рефлектора перемещают и средства, входящие в системы их обезвешивания. Многие из остальных способов обезвешивания (пассивно – активных и активных) имеют сложную конструкцию и были бы неудобны для реализации в условиях цеха АО «ИСС». В результате, наиболее эффективным способом обезвешивания в условиях цеха АО «ИСС» был выбран способ обезвешивания спиц рефлектора антенны, осуществляемый посредством механической силокомпенсирующей системы, состоящей из кареток и тросового подвеса с регулируемой силой его натяжения.



## **2. Объект и методы исследования**

В качестве **объекта** исследования выбран стенд для раскрытия рефлектора антенны с восьмью спицами диаметром 8,6 метров.

**Предметом исследования** является моделирование наземных испытаний рефлекторов антенн, космических аппаратов на стенде с активной системой обезвешивания.

### **2.1 Описание конструкции рефлектора с диаметром 8,6 метров и процесса его раскрытия**

На стенде, разрабатываемом АО «ИСС» и КТИ НП СО РАН в рамках ОКР «Кемчуг», планируется испытывать антенны с рефлекторами, состоящими из четырех, шести, восьми или двенадцати спиц с диаметрами до 24 метров.

Предполагается, что на этом стенде испытания и наземная отработка механических устройств рефлекторов антенн может проводиться в двух вариантах их раскрытия: «раскрытием вверх» и «раскрытием вниз». В первом варианте после раскрытия рефлектор должен занять такое положение, при котором сетеполотно отражателя антенны будет находиться над ним. Во втором варианте сетеполотно отражателя антенны после раскрытия рефлектора должно находиться под ним. Антенны в сборе (с закрепленным на рефлекторе сетеполотном) будут раскрываться только по второму варианту.

Общий вид антенны с рефлектором 8,6 метров представлен на рис. 2.1.

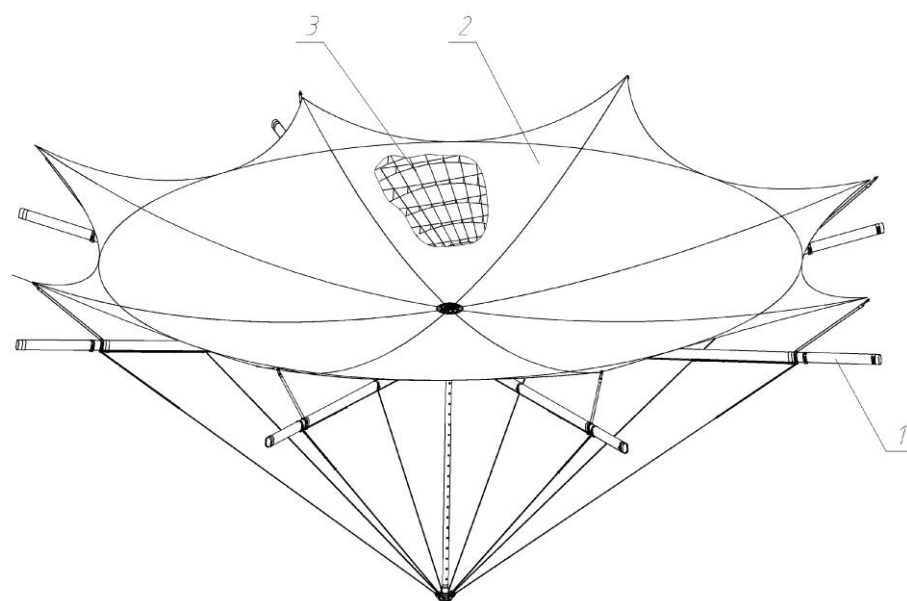


Рисунок 2.1 - Рефлектор с диаметром 8,6 м в рабочем положении:

1 – силовой каркас, 2 – сетеполотно, 3 – структура формообразующая

Раскрытие антенн происходит под действием входящего в ее состав механизма выдвижения мачты (МВМ). Этот механизм приводится в действие встроенным в него электроприводом, связанным через редуктор (типа «винт – гайка», реечно-зубчатый, шнековый) с мачтой, выдвигаемой в процессе раскрытия рефлектора антенны из внутренней части МВМ, которая через прикрепленные к ней и спицам ленточные оттяжки (тяги) раскрывает последние (поворачивает вокруг шарнира их крепления на корпусе антенны) до требуемого их положения в штатном режиме её эксплуатации (рис. 2.2).

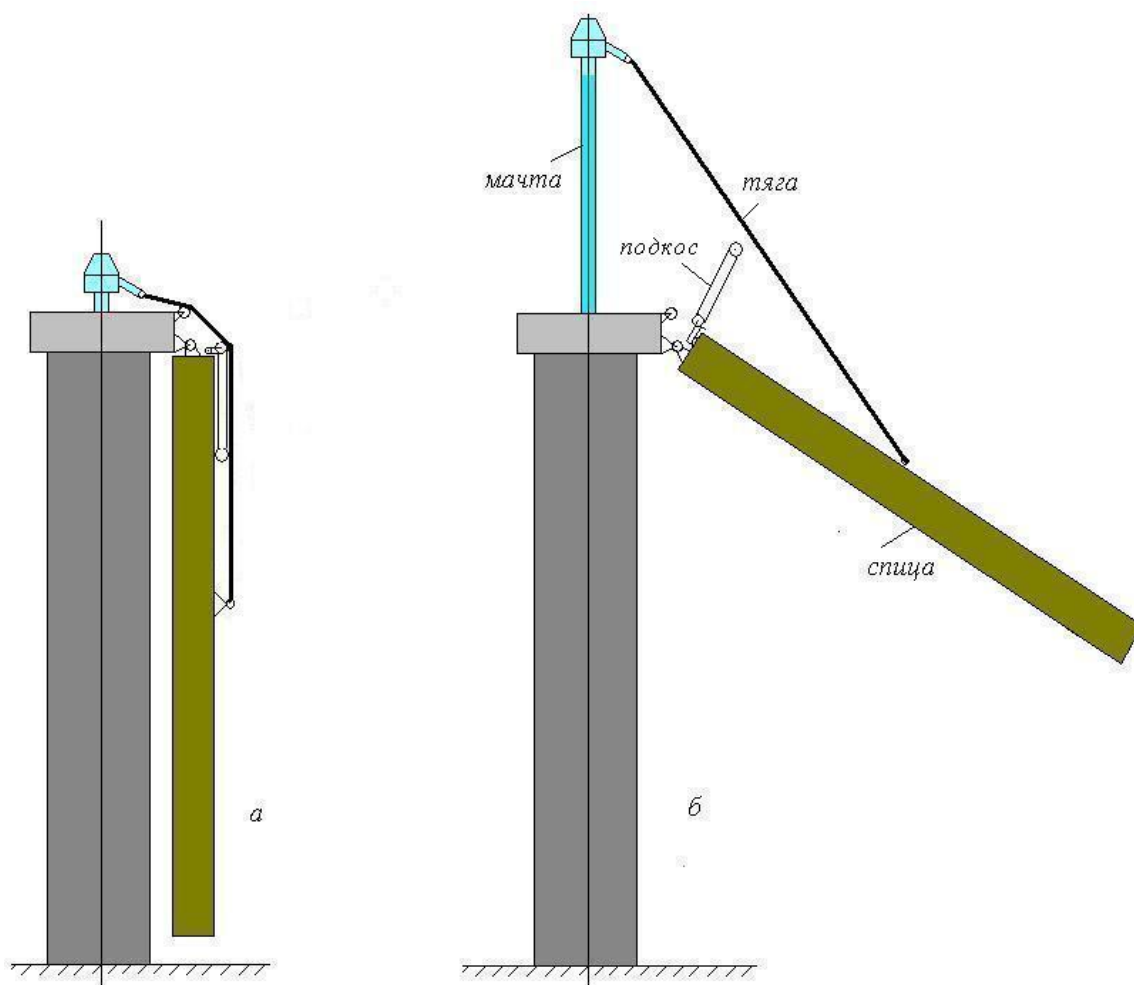


Рисунок 2.2 - Положение спицы рефлектора до начала ее раскрытия (а) и в промежуточном положении (б) в процессе раскрытия

Для антенн диаметром до 10 метров спицы рефлекторов обычно выполняют однозвенными, т. е. не изменяющими свою форму в процессе раскрытия антенны. Корпусы спиц с целью уменьшения веса изготавливаются пустотелыми из углепластика прямоугольно-округлой формы в поперечном сечении (рис. 2.3). В силовой каркас рефлектора входит одна спица круглого сечения, через которую рефлектор соединяется шарнирно с корпусом космического аппарата. [9]



Рисунок 2.3 - Спица рефлектора антенны в сборе

Для увеличения передаваемого на спицу крутящего момента при выдвигании мачты в начале процесса раскрытия антенны на спицах в некоторых вариантах реализации рефлектора размещают подкосы, раскрываемые под действием тяг (оттяжек) при начальных перемещениях мачты антенны еще до начала разворота (раскрытия) спицы. Кинематическая схема такого варианта исполнения рефлектора применительно к одной из его спиц представлена на рис. 2.4.

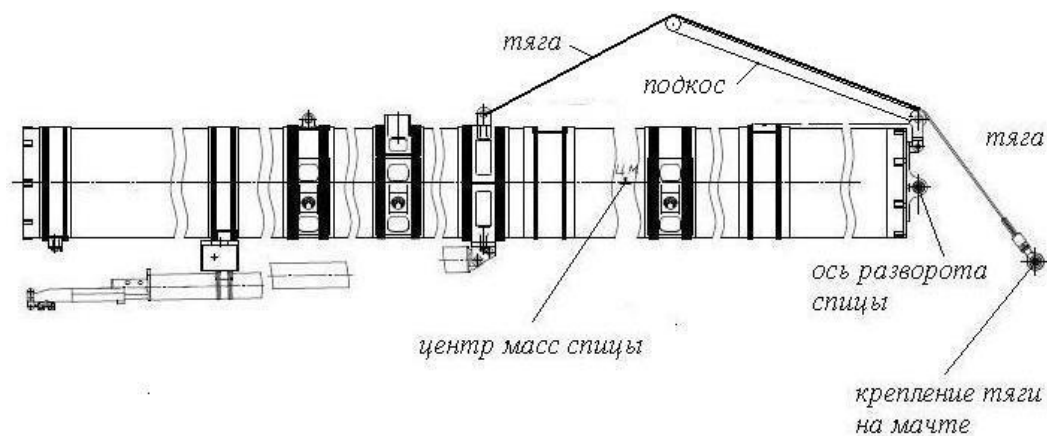


Рисунок 2.4 - Кинематическая схема механизма раскрытия однозвенной спицы рефлектора антенны с использованием подкоса

## 2.2 Методы исследования

В рамках разрабатываемого проекта применимы следующие методы исследования:

- аналитический;

- компьютерного моделирования;
- на заводских стендах в искусственных условиях;
- на натуральных образцах в реальных условиях.

Применение того или иного метода в конкретных условиях определяется требуемой, исходя из задач, поставленных на конкретном этапе работы, точностью и достоверностью результатов, необходимым объемом информации, необходимыми затратами времени, средств и труда при применении различных методов исследований.

### **Аналитический метод исследований**

Анализ и расчет систем и режимов работы, могут быть произведены на основе существующих аналитических методов исследований.

Однако точный аналитический расчет нелинейных или сложных линейных систем представляет собой трудно разрешимую задачу. Поэтому, инженерные исследования целесообразно проводить, сочетая приближенные аналитические расчеты с экспериментальными исследованиями.

Аналитический метод исследований необходим прежде всего для математического описания объекта по данным, полученным при проведении экспериментальных исследований.

### **Метод компьютерного моделирования**

В основу метода математического моделирования систем положено понятие математической модели объекта исследований. В этом случае предметом исследования свойств систем становится не сама физическая система, а ее математическая модель, описывающая динамические процессы, происходящие в системе. Следовательно, математическое моделирование следует понимать как решение задачи преобразования сигналов в структуре математической модели во взаимодействии с сигналами управления и возмущения, определяющими условия функционирования исследуемой системы.

Одним из важнейших критериев качества результатов моделирования является точность. Она зависит от многих факторов, среди которых следует выделить:

- 1) точность собственно математической модели объекта;
- 2) точность вычислителя.

### **Метод стендовых исследований**

Проведение испытаний раскрытия рефлектора антенны в процессе его разработки в реальных условиях невозможно, а запуск устройства без предварительных испытаний может оказаться дорогостоящим мероприятием. В связи с этим становится актуальным создание специальных стендов, позволяющих испытывать раскрытие рефлекторов антенн в искусственно имитируемых условиях невесомости.

Целью стендовых исследований является предварительная проверка опытных образцов устройств в условиях, имитирующих реальные. Объем и содержание отдельных этапов этих исследований определяются целью исследований.

### **3. Алгоритмы управления для активных систем обезвешивания одноствержневых спиц рефлекторов антенн космических аппаратов при наземных испытаниях их механических устройств**

#### **3.1. Постановка задач обезвешивания рефлекторов антенн для наземных испытаний**

Сформулируем задачу, которую должна решать в разрабатываемом в ОКР «Кемчуг» стенде система активного обезвешивания испытуемых механических устройств рефлекторов антенн.

От системы активного обезвешивания требуется, чтобы в процессе испытания работоспособности привода раскрытия антенны он не испытывал дополнительных сил и моментов, создаваемых силами тяжести ее раскрываемых элементов, на всех этапах их работы: от начала раскрытия до его окончания и придания антенне ее рабочей формы. [10,11] Выполнение этого требования позволит приблизить условия работы механизмов антенны во время наземных стендовых испытаний к тем, при которых они работают в космосе. Его реализация равносильна решению задачи обезвешивания элементов антенны, совершающих пространственные перемещения при ее раскрытии.

**Правомерно считать, что система активного обезвешивания раскрываемых на стенде антенн должна решать задачу обеспечения инвариантности системы управления приводом раскрытия антенны к весу раскрываемых ее элементов.**

В разрабатываемом стенде эту задачу планируется решать, обезвешивая каждую из спиц рефлектора антенны за счет их тросового вертикального подвеса на каретках, перемещающихся над рефлектором на горизонтальных направляющих в плоскостях раскрытия спиц. Эти каретки должны работать в режиме слежения и в процессе раскрытия рефлектора обеспечивать с максимально возможной точностью вертикальное положение тросов подвеса спиц. Необходимые для обезвешивания спиц силы

натяжения в тросах их подвеса в стенде должны обеспечивать системы автоматического управления натяжением тросов, которые с этой целью должны с помощью электроприводов не только поддерживать требуемые силы натяжения тросов, но и наматывать на катушки освобождающиеся части тросов подвеса на катушки, размещенные на каретках.

Для обезвешивания каждой спицы рефлектора необходимо, чтобы в процессе ее работы суммарный момент вращения относительно центра масс спицы поддерживался в процессе раскрытия рефлектора на нулевом уровне.

Данное утверждение было бы справедливым в тех случаях, когда решалась бы задача обезвешивания спиц (или каких-то других изделий неизменяемой формы), свободно перемещающихся в трехмерном пространстве и закрепленных на вертикальном тросе в их центре масс.

При раскрытии рефлекторов антенн на разрабатываемом в ОКР «Кемчуг» стенде **каждую однозвенную спицу следует рассматривать как балку, шарнирно закрепленную своим одним концом на неподвижном основании и подвешиваемую на тросе (не обязательно с закреплением его в центре масс этой балки)**. Расчетная схема раскрытия спицы в этой интерпретации представлена на рис. 3.1.

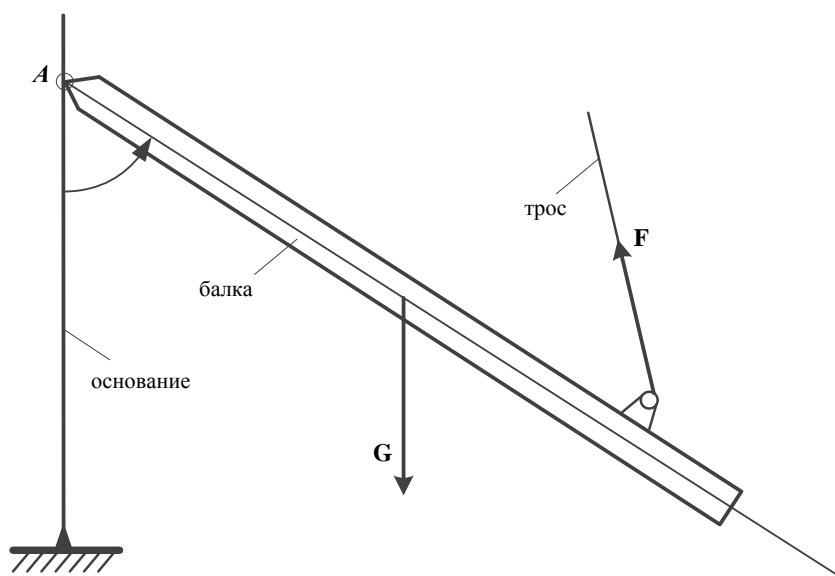


Рисунок 3.1 - Схема тросового обезвешивания балки, шарнирно закрепленной одним своим концом на основании



В этой связи задача обеспечения инвариантности работы привода раскрытия спицы от ее веса сводится к созданию системой активного обезвешивания стенда такой силы натяжения троса, которая в совокупности с весом спицы при любых положениях спицы во время ее раскрытия обеспечивала бы выполнение следующих условий:

$$M_A(\mathbf{G}) + M_A(\mathbf{F}) = 0; \quad (3.1)$$

$$\mathbf{F}_A(\mathbf{G}) + \mathbf{F}_A(\mathbf{F}) = 0. \quad (3.2)$$

В равенствах (3.1) и (3.2) использованы следующие обозначения:

$\mathbf{G}$  – вектор силы веса обезвешиваемой спицы;

$\mathbf{F}$  – вектор силы натяжения троса обезвешивания;

$M_A(\mathbf{G})$  – момент, создаваемый вектором силы веса спицы относительно оси А ее разворота при раскрытии;

$M_A(\mathbf{F})$  – момент, создаваемый вектором силы натяжения троса относительно оси А ее разворота при раскрытии;

$\mathbf{F}_A(\mathbf{G})$  – вектор силы давления на шарнирное сочленение спицы с основанием, создаваемый вектором силы веса спицы;

$\mathbf{F}_A(\mathbf{F})$  – вектор силы давления на шарнирное сочленение спицы с основанием, создаваемый вектором силы натяжения троса.

**Равенства (3.1) и (3.2) и являются условиями абсолютной инвариантности работы привода раскрытия спицы антенны от ее веса, которые должна обеспечить система активного обезвешивания стенда за счет генерации на всем периоде раскрытия рефлектора антенны такой силы натяжения троса  $\mathbf{F}(t)$  антенны, при которой выполняются данные равенства.**

Априори следует признать, что добиться при стендовых испытаниях механических устройств антенн абсолютной инвариантности к воздействиям на них веса раскрываемых элементов антенны при закладываемых в разрабо-

тываемый стенд систем активного обезвешивания не удастся в силу целого ряда причин. Перечислим основные из них.

1. В тех случаях, когда механические устройства рефлекторов антенн будут испытываться на стенде при полной сборке антенны (с закрепленным на рефлекторе сетеполотном отражателя антенны), трудно будет определить местоположение центра масс спицы и поддерживаемой ею части сетеполотна отражателя. К тому же, он будет менять свое положение в зависимости от угла раскрытия  $\alpha$  спицы.

2. Не учитывается конечная жесткость элементов спиц антенн, в связи с которой при их раскрытии изменяется не только их угловое положение, но и связанные с их гибкостью прогибы и смещения центров масс спиц или их звеньев.

3. Не учитывается влияние аэродинамических сил, действующих на антенну и ее рефлектор в цеховых условиях при их раскрытии.

### **3.2. Алгоритм обезвешивания спицы при креплении троса подвеса в ее центре масс и на подвижной каретке**

Задача обезвешивания при наземных испытаниях раскрытия спиц рефлектора в тех случаях, когда эти спицы являются одностержневыми, может быть сведена к решению задачи обезвешивания балки, шарнирно закрепленной одним из своих концов на жестком основании, имитирующем корпус космического аппарата. Упрощенная схема такой балки, обезвешиваемой с помощью системы активного обезвешивания, использующей тросовый подвес и кареткой, представлена на рис. 3.2.

На этом рисунке использованы следующие обозначения:  $B$  – балка длиной  $AB$ ,  $Tr$  – трос подвеса балки,  $K$  – каретка для ее подвеса, перемещающаяся по горизонтальной направляющей  $H$ . Предполагается, что данная балка шарнирно закреплена на основании в точке  $A$ . Ее центр масс находится в точке  $C$ . Крепится балка на тросе в точке  $C$  (в ее центре масс), а

верхний конец троса закреплен на шпуре, размещенной на каретке К, которая оснащена системой автоматического управления силой натяжения троса и следящей системой, обеспечивающей при испытании привода поворота балки, размещаемого в точке А, такое перемещение каретки по горизонтальной направляющей так, чтобы трос подвеса оставался по возможности более точно в вертикальном положении.

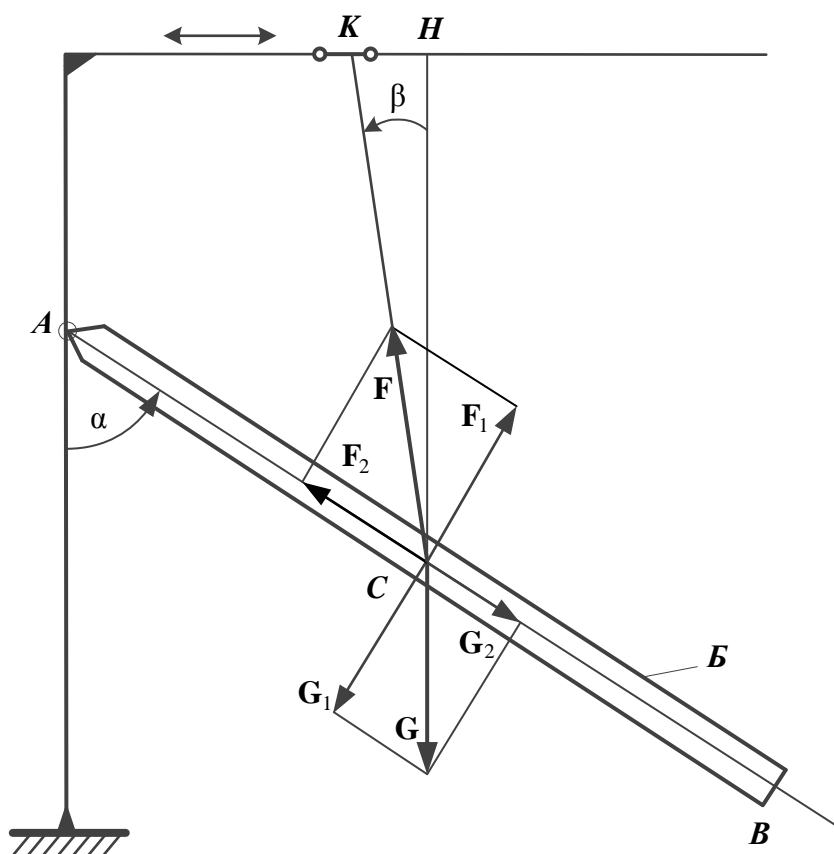


Рисунок 3.2 - Схема обезвешивания балки, шарнирно закрепленной одним из своих концов на жестком основании

Задача активной системы обезвешивания сводится к минимизации влияния всех устройств, предназначенных для обезвешивания балки, на ее движения в процессе работы привода ее раскрытия. Будем полагать, что в исходном состоянии балка перед началом работы ее привода раскрытия находится в вертикальном положении. Ее относительное угловое положение в процессе раскрытия определяется углом  $\alpha$ , а текущее угловое отклонение троса от вертикали – углом  $\beta$ .

Задача системы обезвешивания активной (СОА) – нейтрализовать влияние веса балки на процесс ее разворота («раскрытия»), как это бы имело место при ее раскрытии в космическом пространстве. Это значит, что в идеале требуется обеспечить в процессе раскрытия балки суммарные силы и вращающие моменты, передаваемые на нее от тросового подвеса и силы тяжести балки, равными нулю. Именно эти требования и определяют алгоритм работы СОА.

Определим, указанные выше силы и моменты, используя принятые в подразделе 1.2 обозначения и полагая в дальнейших математических выкладках, что центр масс балки находится от центра ее подвеса на расстоянии  $L_{AC} \triangleq AC$ . В таком случае силу веса балки  $\mathbf{G}$  при ее угле поворота, равном  $\alpha$ , можно разложить на две взаимно составляющих  $\mathbf{G}_1$  и  $\mathbf{G}_2$ , первая из которых ортогональна оси балки, а вторая – направлена по этой оси. При этом

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha; \quad (3.3)$$

$$\mathbf{G}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha. \quad (3.4)$$

Подобным же образом разложим на взаимно-ортогональные составляющие и силу  $\mathbf{F}$  натяжения троса. В результате проекция этой силы на ось балки определится как

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta), \quad (3.5)$$

а ортогональная к ней проекция

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta). \quad (3.6)$$

В таком случае обусловленный действием веса балки  $\mathbf{G}$  и силой натяжения троса  $\mathbf{F}$  вращающий момент относительно оси шарнира  $A$  может быть определен как

$$\mathbf{M}_A = L_{AC} \cdot (\mathbf{F}_1 - \mathbf{G}_1) = L_{AC} \cdot (\mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mathbf{G} \cdot \sin \alpha), \quad (3.7)$$

а действующая под влиянием  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{F}$  вдоль оси балки на ее опору в точке  $A$  сила

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{G}_2 - \mathbf{F}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha - \mathbf{F} \cdot \cos (\alpha - \beta). \quad (3.8)$$

Обезвешивание балки будет идеальным в ситуациях, когда

$$\mathbf{M}_A \equiv 0 \text{ и } \mathbf{F}_A \equiv 0. \quad (3.9)$$

Для выполнения этих условий необходимо, чтобы в процессе разворота балки под действием ее привода выполнялось условие

$$\mathbf{M}_A = L_{AC} \cdot (\mathbf{F} \cdot \sin (\alpha - \beta) - \mathbf{G} \cdot \sin \alpha) \equiv 0, \quad (3.10)$$

что равносильно требованию, чтобы величина силы натяжения троса

$$F = G \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha - \beta)}. \quad (3.11)$$

где здесь и далее

$$F \triangleq |\mathbf{F}|; \quad G \triangleq |\mathbf{G}|. \quad (3.12)$$

В этом случае согласно (3.8) и (3.11) будет выполняться и второе условие из (3.9).

Следовательно, в процессе разворота балки с целью исключения влияния ее веса на работу приводного двигателя сила натяжения троса должна удовлетворять условию (3.9) и, значит, задающее воздействие  $F_{уст}$  на систему автоматического управления натяжением троса в системе активного обезвешивания балки следует формировать как

$$F_{зад} = G \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha - \beta)}. \quad (3.13)$$

Оно будет равно силе веса балки лишь в том случае, когда следящая система каретки в процессе разворота балки будет обеспечивать строго вертикальное положение троса подвеса, т. е. выполнять условие  $\beta = 0$ .

Алгоритм (3.13) решения задачи обезвешивания шарнирно-закрепленного изделия, по-видимому, является наиболее простым. Однако его реализация при стендовых испытаниях не гарантирует абсолютной инвариантности работы механических устройств рефлектора от веса спиц, так как на практике трудно (а может даже практически невозможно) обеспечить совмещение точки вывески троса подвеса спицы точно в центре

ее масс в связи с конструктивными особенностями самой спицы и реализуемого в разрабатываемом стенде подвеса. Более того, задача указанной инвариантности осложнена уже отмеченными в конце подраздела 2 факторами.

### 3.3. Алгоритм обезвешивания спицы при креплении троса подвеса не в ее центре масс и на подвижной каретке

Схема такого подвеса представлена на рис. 3.3.

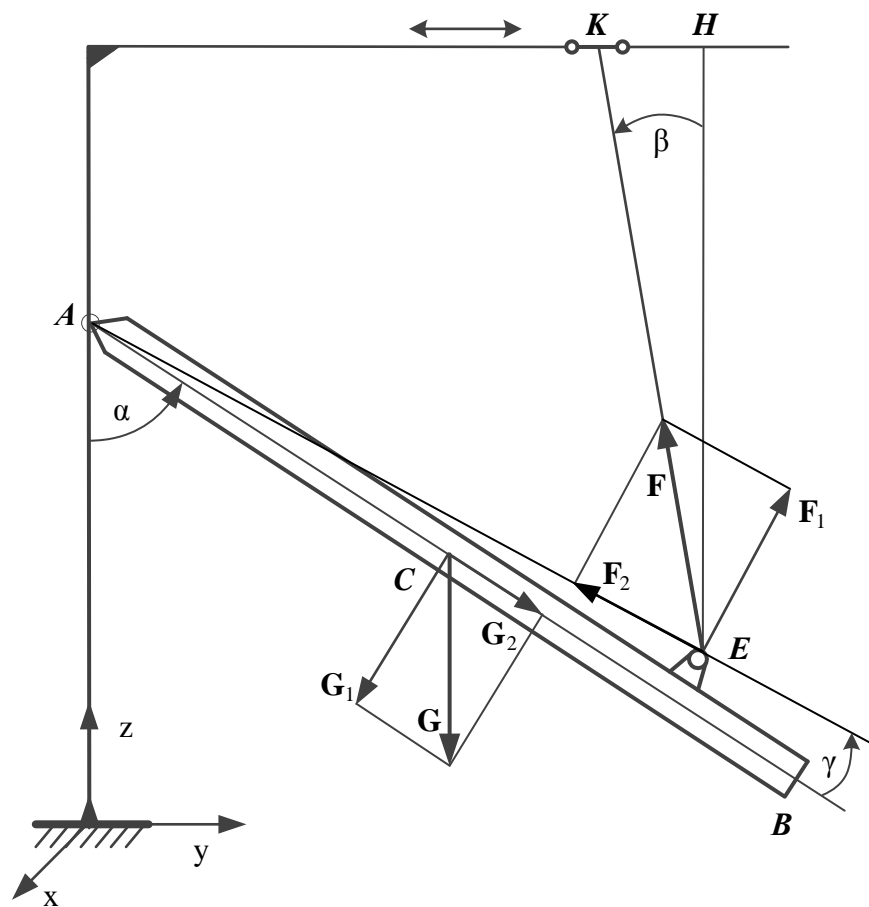


Рисунок 3.3 - Схема обезвешивания балки, шарнирно закрепленной одним из своих концов на жестком основании при несовпадении ее центра масс и точки вывески

В данном случае точка крепления троса подвеса  $E$  на балке не совпадает с ее центром масс  $C$ . Далее полагаем, как и в подразделе 3.2, что

$L_{AC} \triangleq AC$  и что радиус-вектор точки вывески  $E$  относительно центра  $A$  шарнирного соединения балки со стойкой равен  $L_{AE} \triangleq AE$ .

При таком варианте подвеса проекции силы веса балки на ее ось  $AA_1$  и в перпендикулярном к ней направлении будут определяться теми же формулами (3.3) и (3.4), что и в рассмотренном выше варианте подвеса, т.е.

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha; \quad \mathbf{G}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha. \quad (3.14)$$

Проекция силы натяжения троса  $\mathbf{F}$  на направление  $AE$  будет определяться формулой

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha + \gamma - \beta), \quad (3.15)$$

где  $\gamma$  – угол между осью балки  $AA_1$  и радиусом-вектором  $AE$  точки закрепления троса подвеса.

Другая составляющая силы натяжения троса  $\mathbf{F}$  при таком ее разложении на два ортогональных направления определяется как

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F} \cdot \sin(\alpha + \gamma - \beta), \quad (3.16)$$

При этом момент вращения балки относительно ее оси вращения  $A$  в шарнирном сочленении, создаваемый совокупностью силы веса балки и силы натяжения троса ее подвеса

$$\mathbf{M}_A = \mathbf{F}_1 \cdot L_{AE} - \mathbf{G}_1 \cdot L_{AC} = \mathbf{F} \cdot L_{AE} \cdot \sin(\alpha + \gamma - \beta) - \mathbf{G} \cdot L_{AC} \cdot \sin \alpha. \quad (3.17)$$

Этот момент в процессе разворота балки будет равен нулю при условии, что сила натяжения троса при этом будет поддерживаться равной

$$F = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma - \beta)}. \quad (3.18)$$

Следовательно, задающее воздействие на систему автоматического управления силой натяжения троса вывески должно быть равным

$$F_{\text{зад}} = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma - \beta)}. \quad (3.19)$$

Если при этом сила натяжения троса будет точно определяться согласно (3.19), то для ее составляющей  $\mathbf{F}_2$  вдоль оси  $AE$  будет справедливо следующее расчетное значение:

$$\begin{aligned} F_2 &= G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma - \beta)} \cdot \cos(\alpha + \gamma - \beta) = \\ &= G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \gamma - \beta). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Если при наземных испытаниях обезвешиваемое изделие удастся подвесить так, что будет выполнено условие  $\gamma = 0$  и ошибка в работе следящей системы каретки будет незначительной в пересчете на угол  $\beta$  отклонения троса от вертикали, то составляющая  $\mathbf{F}_2$  силы натяжения троса может быть приближенно определена по формуле:

$$\mathbf{F}_2 \cong \mathbf{G} \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \cos \alpha. \quad (3.21)$$

Следовательно, её величина зависит от текущего углового положения балки.

При выполнении указанных выше условий ( $\gamma = 0$ ,  $\beta \approx 0$ ) задающее воздействие вида (3.19) может быть заменено на более простое, а именно:

$$F_{\text{зад}} = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}}, \quad (3.22)$$

т.е. принято в том же виде, что и для ситуации, когда изделие подвешивается в его центре масс.

Отличительной особенностью рассмотренного в данном подразделе варианта обезвешивания балки по сравнению с предыдущим вариантом является то, что даже при идеальной работе автоматической системы активного обезвешивания (ее следящей системы каретки и системы натяжения троса подвеса), суммарная сила давления на подшипник шарнирного подвеса не будет равна нулю. Ее значение определяется векторной суммой  $\mathbf{G}_2 + \mathbf{F}_2$ .



Проекции суммы сил  $\mathbf{G}_2 + \mathbf{F}_2$  на оси  $Y$  и  $Z$  опорного для стенда обезвешивания ортогонального трехгранника осей  $XYZ$ , приведенные к точке  $A$  (оси шарнира) и обозначаемые далее как  $\mathbf{F}_{Ay}$  и  $\mathbf{F}_{Az}$ , согласно рис. 3.3, равны:

$$\mathbf{F}_{Ay} = -\mathbf{F}_2 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + \mathbf{G}_2 \cdot \sin \alpha; \quad (3.23)$$

$$\mathbf{F}_{Az} = \mathbf{F}_2 \cdot \cos(\alpha + \gamma) - \mathbf{G}_2 \cdot \cos \alpha. \quad (3.24)$$

Итоговый вектор силы, с которым спица будет давить на опору в ее сочленении корпусом механизма выдвижения мачты рефлектора

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_{Ay} + \mathbf{F}_{Az}, \quad (3.25)$$

а ее модуль может быть вычислен по формуле:

$$|\mathbf{F}_A| = \sqrt{\mathbf{F}_{Ay}^2 + \mathbf{F}_{Az}^2}. \quad (3.26)$$

Эта сила будет создавать дополнительный момент сухого трения в сочленении спицы с корпусом МВМ и тем самым искажать процесс раскрытия рефлектора на стенде по сравнению с тем, что будет происходить при раскрытии антенны в космосе. Заметим, что направление приложения силы  $\mathbf{F}_A$  в сочленении в данном случае не имеет существенного значения.

Точная реализация алгоритма (3.19) управления обезвешиванием шарнирно-закрепленной балки является относительно сложным в реализации решением, так как требует информацию о текущих значениях угла  $\alpha$  поворота балки и угла  $\beta$  отклонения троса подвеса от вертикали. Его можно существенно упростить, если в следящей системе привода каретки установить заданное значение угла  $\beta$  не равным нулю, а принять постоянным

$$\beta_{\text{зад}} = \gamma. \quad (3.27)$$

В таком случае при его достаточно точной отработке следящей системой каретки алгоритм (3.19) может быть заменен на более простой, соответствующий (3.22). При этом в процессе разворота балки уставка в канале автоматического управления силой натяжения троса будет

постоянной и не потребуется для ее задания использовать текущие значения  $\alpha$  и  $\beta$ .

Но даже при подстройке (3.27) и реализации алгоритма (3.22) в системе обезвешивания необходимость стремиться совместить точку закрепления троса вывески на спице с центром ее масс как минимум потому, что чем больше будет разница между их положениями, тем больше будет сила  $F_A$  в сочленении спицы с корпусом МВМ и, соответственно, нарушение условия (3.2) абсолютной инвариантности процесса раскрытия спицы от ее веса.

#### **3.4. Выбор варианта вывески спиц рефлекторов антенн для разрабатываемого стенда**

Рассмотренные выше оба варианта подвеса обезвешиваемого изделия сопряжены с трудностями в их практической реализации.

Наиболее привлекательным вариантом обезвешивания, как уже отмечалось выше, является первый из рассмотренных вариантов, при котором трос вывески спицы крепится в ее центре масс. Конструкции антенн больших диаметров и спиц их рефлекторов затрудняют крепление тросов подвеса в центрах масс спиц. В разработанных АО «ИСС» антеннах больших диаметров для раскрытия спиц рефлектора используются встраиваемый в антенну механизм выдвижения мачты (МВМ), приводимый электродвигателем. [12] При этом для раскрытия рефлектора антенны с прикрепленным к нему сетеполотном все спицы рефлектора крепятся к мачте оттяжками ленточного типа шириной порядка 40 мм (рис. 3.4).

Если проводить на разрабатываемом в рамках ОКР «Кемчуг» стенде раскрытие рефлектора так, чтобы в его рабочем положении сетеполотно оказалось над ним, то тросы вывески спиц должны будут проходить через сетеполотно антенны и при раскрытии ее рефлектора «прорезать» его, что, естественно, не допустимо. По этой причине на данном стенде раскрытие

рефлекторов антенн, оснащенных механизмами выдвижения мачт, может проводиться с выдвижением их мачт только вверх.

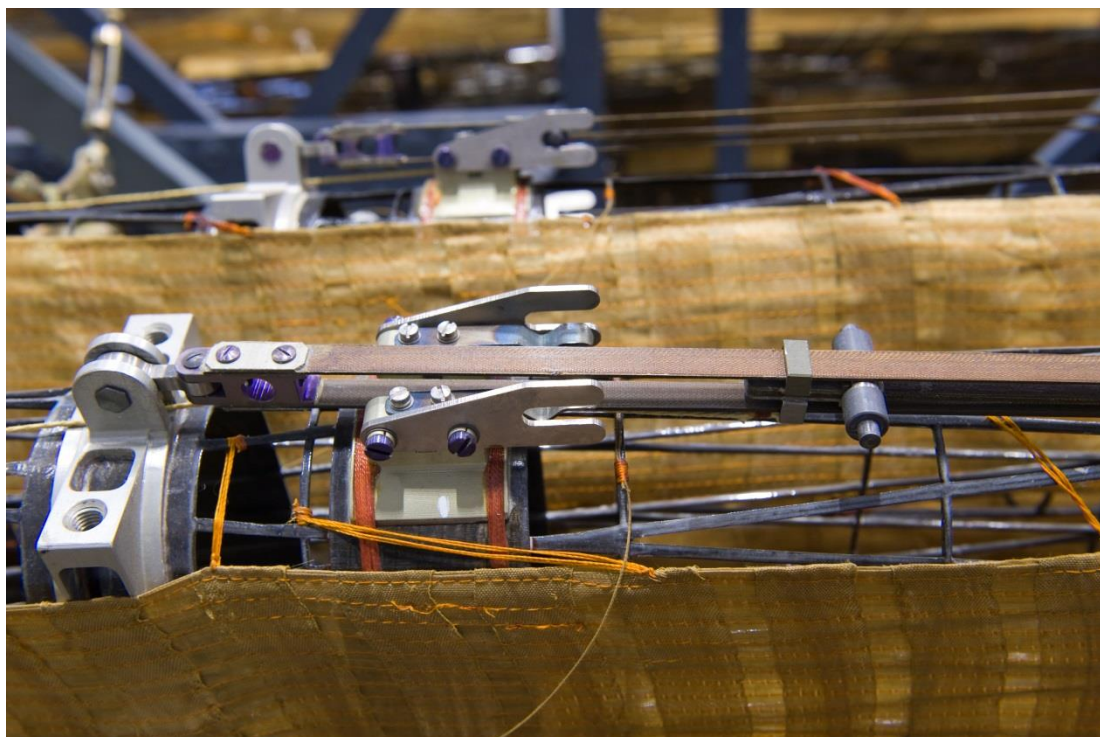


Рисунок 3.4 - Расположение спицы и тяги ее раскрытия в горизонтальном транспортировочном положении

Если раскрытие рефлектора проводить на стенде так, чтобы в рабочем его положении сетеполотно оказалось под ним (т. е. с выдвижением мачты вверх), то в процессе раскрытия оттяжки (тяги), связывающие спицы с мачтой, будут располагаться непосредственно над приводимыми ими спицами (рис. 3.4), перемещаться в вертикальных плоскостях раскрытия спиц и перекрывать доступ к спице для троса системы активного обезвешивания по всей длине спицы от шарнира ее крепления на основании антенны до точки закрепления на ней оттяжки.

С учетом того, что ширина тяг раскрытия спиц порядка 40 мм, в процессе раскрытия спиц в вертикальной плоскости над строительной осью каждой спицы будет такой ширины зона рабочих положений тяги ее раскрытия и эта зона будет закрывать сверху центр масс спицы в течение

всего времени раскрытия рефлектора. В этой связи тросовый вертикальный подвес спицы в одножильном варианте его исполнения с креплением его на спице в зоне ее центра масс и на вертикально расположенной над ним каретке не возможен.

Второй схемотехнический вариант обезвешивания, когда трос вывески крепится на спице в ее концевой части (после места закрепления на ней оттяжки привода раскрытия) будет ряд достоинств лишь в тех случаях, когда на спицах не устанавливаются подкосы для увеличения моментов, прилагаемых к спицам через оттяжки в начальные моменты их раскрытия.

Если же спицы будут иметь подкосы, то при начальных этапах раскрытия спиц подкос с размещаемой на нем ленточной оттяжкой будет препятствовать вертикальному расположению одножильного троса обезвешивания (будет их перехлест, оттяжка также будет находиться в рабочей зоне этого троса на первом этапе раскрытия рефлектора).

По этой причине и в этом случае необходимо выбрать какое-либо другое схемотехническое решение подвеса спицы или приводных элементов ее раскрытия (ленточную оттяжку и подкос).

Учитывая выше изложенное, предлагается следующий вариант крепления тросов вывески на спицах.

### **3.5. Вариант крепления троса вывески на спице в ее центре масс с использованием сдвоенного его исполнения**

Этот вариант вывески можно считать наиболее предпочтительным из всех возможных вариантов крепления троса вывески на спице, так как только в случае закрепления троса именно в центре масс спицы потенциально обеспечиваются необходимые условия абсолютной инвариантности процесса раскрытия спиц от их веса (его влияния). Для такого решения проблемы можно принять и реализовать при наземных стендовых испытаниях механических устройств рефлекторов антенн следующие технические решения.

1. В месте центра масс спицы на ней жестко устанавливается бандажное приспособление (хомут) для закрепления тросового подвеса. В частности, для передающих антенн диаметром 8,6 метра такое приспособления должно располагаться на спицах с порядковыми номерами от 2 до 8 на расстоянии  $3175 \pm 100$  мм от осей их поворота на основании рефлектора и на расстоянии  $3290 \pm 100$  мм – на силовой спицы № 1 диаметром 230 мм, к которой крепится блок механический устройства поворота рефлектора.

2. Тросовый подвес в нижней части между спицей и подвижным роликом полиспаста следует выполнить в двухтросовом исполнении, как это показано на рис. 3.5. Длина двухтросового подвеса  $L_{2Т}$  должна превышать длину спицы  $L_{AC}$  (см. рис. 3.3) от ее центра масс до оси поворота  $A$  на величину  $\Delta L_{2Т}$ , то есть должна выбираться из условия:

$$L_{2Т} > L_{AC} + \Delta L_{2Т}. \quad (3.28)$$

Включаемая в соотношение (3.28) величина  $\Delta L_{2Т}$  должна обеспечивать свободное прохождение подкоса и оттяжки спицы между двумя тросами ее подвеса в процессе раскрытия спицы из исходного транспортного положения до ее рабочего положения. Эту величину не трудно вычислить при заданных конструктивных параметрах рефлектора.

3. Для удержания двух тросов вывески спицы параллельными в процессе ее раскрытия следует установить жесткий фиксатор тросов (рис. 3.5), после которого подвес выполняется в однотросовом исполнении вплоть до шпули каретки системы активного обезвешивания этой спицы и в том его запасе, который наматывается на шпулю. При этом датчик веса желательно расположить сразу за фиксатором тросов.

4. Если в создаваемом стенде будет реализован заложенный в конструкторскую документацию полиспастный подвес, то подвижный ролик полиспаста следует располагать сразу же за датчиком веса. Это позволит

снизить требования к высоте цеха, в котором предполагается разместить этот стенд.

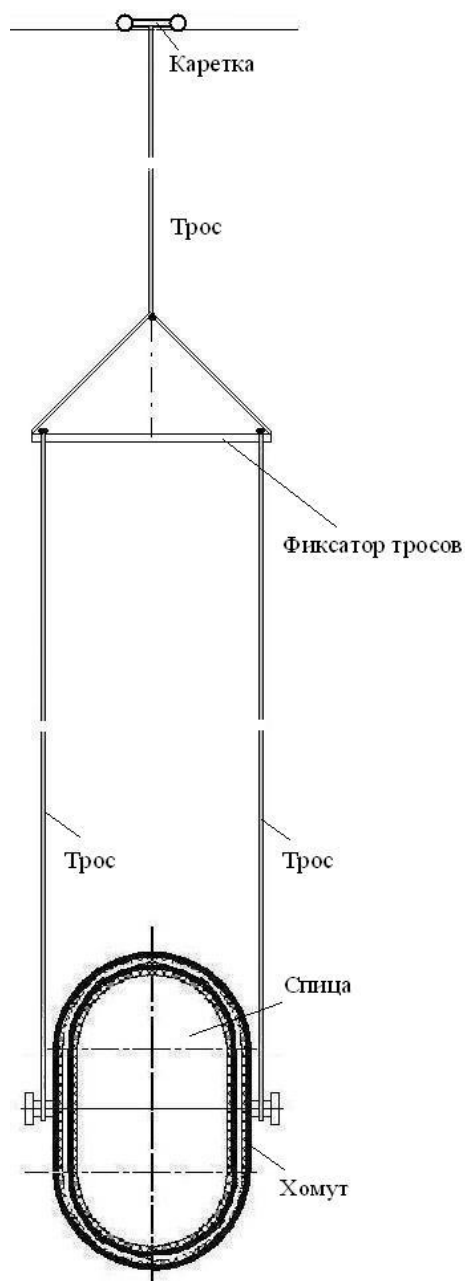


Рисунок 3.5 - Вариант комбинированного тросового подвеса спицы

При высоте цеха в 11 метров указанная выше компоновка подвеса спиц будет гарантированно приемлемой для раскрытия рефлекторов диаметром 8,6 метра, но может оказаться недостаточной для испытаний рефлекторов диаметром 12 метров и более.

В этой связи придется принимать решение относительно выбора другого варианта вывески спиц (не в центрах масс их звеньев). Наиболее простым решением в таком случае будет перенос точек вывески, как минимум, у корневых звеньев спиц в их конец, но и в этом случае **однотросовый вариант вывески будет неприемлемым из-за его перехлеста с подкосом и оттяжкой** на первой стадии раскрытия спицы. Более того, перенос точки вывески звена спицы из центра его масс в какую либо другую точку приведет к тому, что **условия (3.1) и (3.2) абсолютной инвариантности процесса раскрытия спицы от ее веса окажутся даже потенциально не выполнимыми**. Следовательно, **будет неизбежно существенно нарушена на создаваемом стенде имитация невесомости при раскрытии на нем рефлекторов антенн**, а значит, и существенно снизится эффективность наземной отработки на таком стенде механических устройств рефлекторов антенн.

## **4. Определение основных кинематических зависимостей разрабатываемой математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн**

### **4.1 Исследование кинематической зависимости углов механизма раскрытия спиц от выдвижения мачты**

Для успешного моделирования процессов раскрытия спиц рефлектора антенн необходимо знать кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты. Расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора представлена на рис. 4.1. Из этой схемы видно, что наиболее важными углами, влияющими на ход моделирования, являются углы  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ .

В основу определения зависимостей углов механизма раскрытия спицы от выдвижения мачты были заложены параметры замкнутой кинематической цепи, включающей основание антенны, мачту МВМ, ленточную оттяжку, подкос и саму спицу (рис 4.1 - 4.1).

Из этих рисунков очевидно, что для вывода наиболее точных кинематических зависимостей углов механизма раскрытия спицы от выдвижения мачты, необходимо все фазы раскрытия рефлектора разделить на три периода: от транспортировочного положения рефлектора до момента фиксации подкоса, с момента фиксации подкоса и до его отсоединения, с момента отсоединения подкоса и до рабочего положения рефлектора, причем промежуточным положением фазы раскрытия рефлектора между его транспортировочным положением и фиксацией подкоса можно пренебречь, ввиду отсутствия его существенного влияния на результаты подсчета.

Для исследования зависимостей кинематических углов механизма раскрытия спицы от выдвижения мачты был использован пакет расширения Matlab - Curve Fitting Toolbox, предназначенный для различных прикладных задач аппроксимации и интерполяции данных, включающий в себя интерактивные средства предварительной обработки данных, сравнения



стандартных моделей и разработки моделей пользователя, подгонки с помощью стандартных и робастных методов и анализа качества аппроксимации. [13, 14]

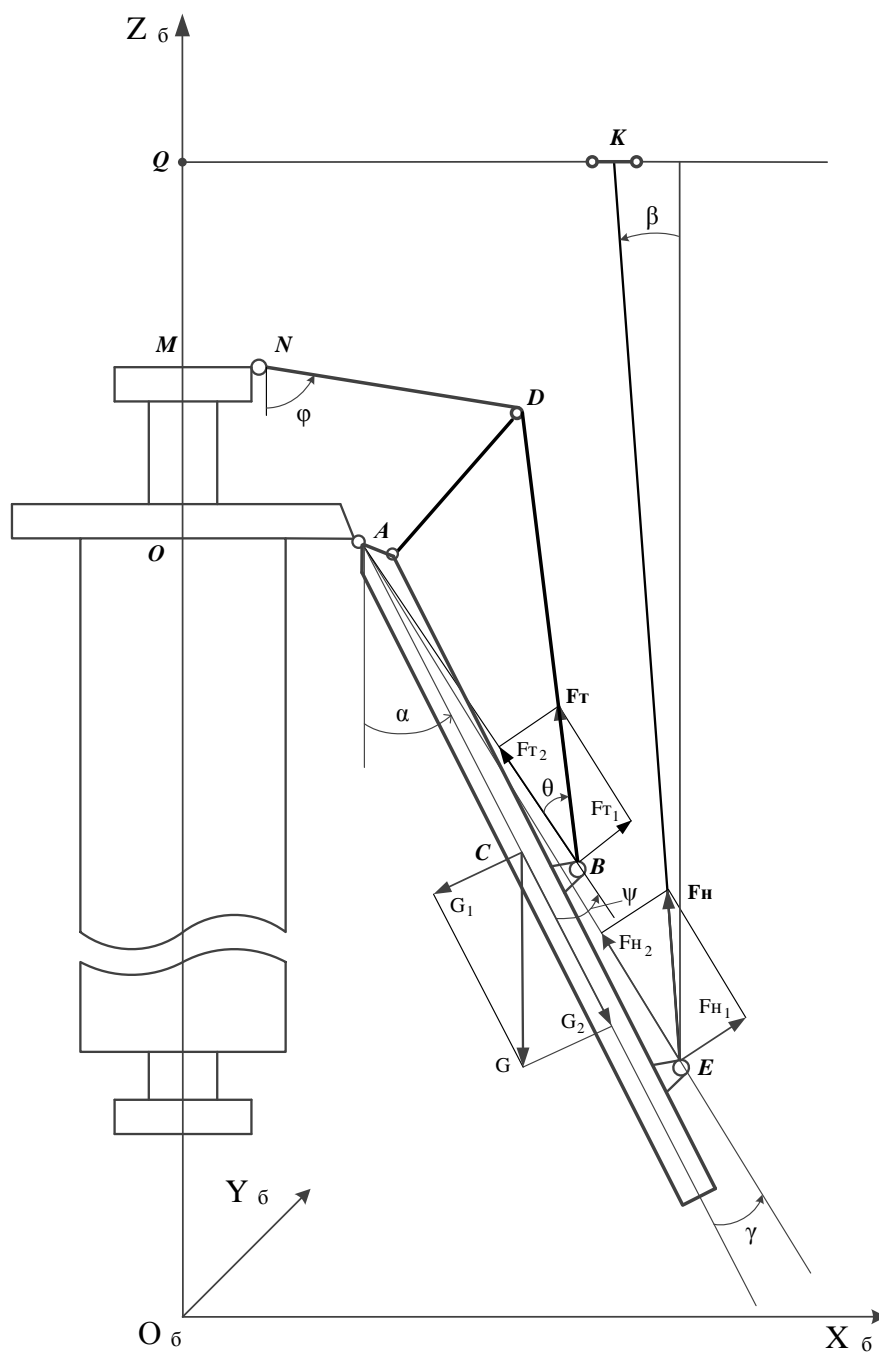


Рисунок 4.1 – Расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора

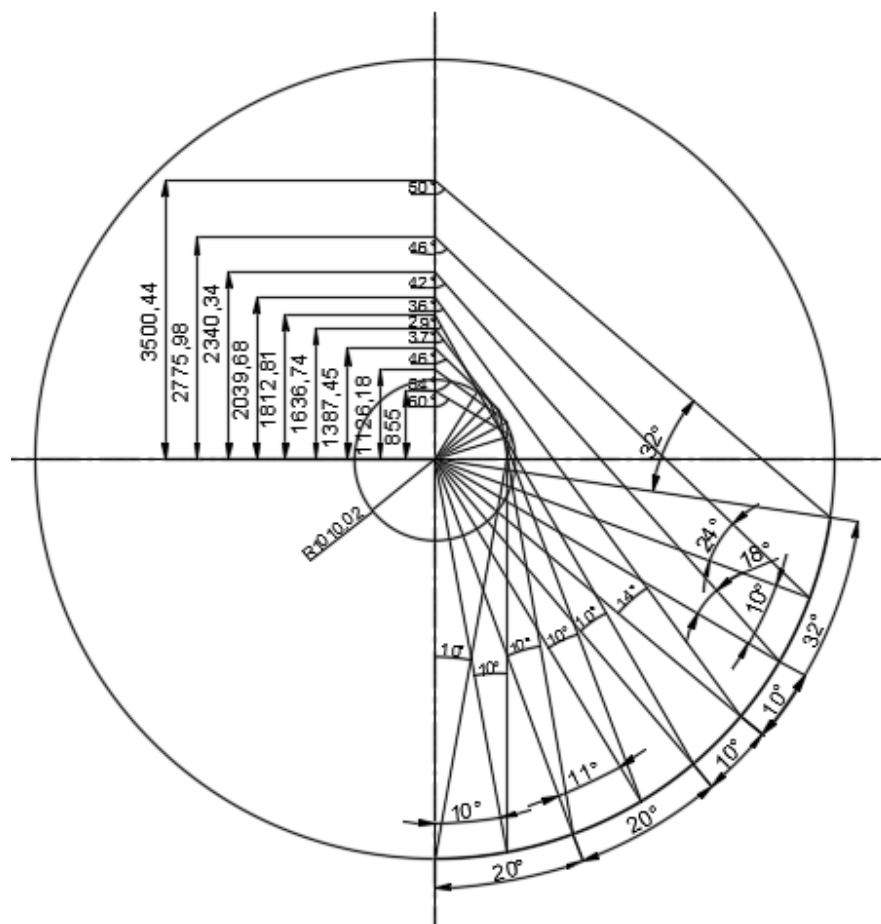


Рисунок 4.2 – Фазы раскрытия рефлектора от момента фиксации подкоса до рабочего положения

Угол раскрытия спицы  $\alpha$  связан через ленточную оттяжку, используемую для раскрытия спицы, с перемещением мачты  $Z_M$  уравнением:

$$\alpha = K_{MC}(Z_M) \cdot Z_M, \quad (4.1)$$

где  $K_{MC}$  – коэффициент передачи между перемещением мачты и углом раскрытия спицы. Следует заметить, что  $K_{MC}$  в процессе раскрытия спицы не будет все время оставаться постоянной величиной.

Аналитическая зависимость угла раскрытия  $\alpha$  спицы от перемещения  $Z_M$  мачты была определена по параметрам замкнутой кинематической цепи, включающей основание антенны, мачту МВМ, лентовую оттяжку, подкос и саму спицу (рис. 4.1). Эта зависимость выглядит следующим образом:

$$\alpha(Z_M) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0,2 \leq Z_M \leq 0,9 \text{ м} \\ 0,729 \cdot Z_M - 0,623, & \text{при } 0,9 \text{ м} < Z_M < 2,0 \text{ м} \\ -0,174 \cdot Z_M^2 + 1,351 \cdot Z_M - 1,171, & \text{при } 2,0 \text{ м} \leq Z_M \leq 3,5 \text{ м} \end{cases} \quad (4.2)$$

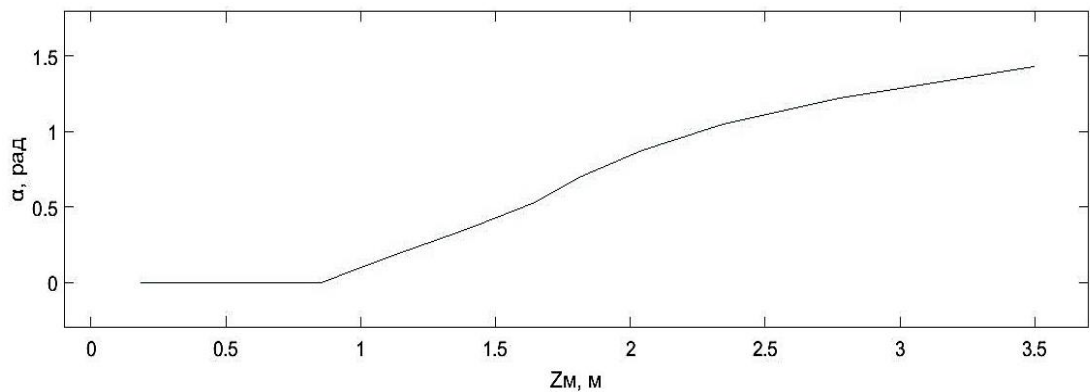


Рисунок 4.3 – График зависимости угла раскрытия спицы  $\alpha$  от механизма выдвижения мачты  $Z_M$

Из представленного графика видно, что зависимость в каждый из периодов раскрытия рефлектора линейная, отличающаяся лишь незначительным изгибом в третий период, который указывает на постепенное уменьшение скорости раскрытия спицы в третий период раскрытия рефлектора. [15]

Одним из важных кинематических углов раскрытия спицы является угол между спицей и присоединенной к ней оттяжкой  $\theta$ . Для максимальной точности представления этой зависимости как и в предыдущем случае процесс изменения угла между спицей и оттяжкой был разбит на три периода.

На основании вышесказанного, а также параметров замкнутой кинематической цепи, включающей основание антенны, мачту МВМ, лентовую оттяжку, подкос и саму спицу, с помощью средств пакета расширения Matlab - Curve Fitting Toolbox была получена следующая зависимость:

$$\theta_{MC}(Z_M) = \begin{cases} 0,261 \cdot Z_M - 0,048, & \text{при } 0,2 \leq Z_M \leq 0,9 \text{ м} \\ 0,174, & \text{при } 0,9 \text{ м} < Z_M < 2,0 \text{ м} \\ 0,215 \cdot Z_M - 0,189, & \text{при } 2,0 \text{ м} \leq Z_M \leq 3,5 \text{ м} \end{cases} \quad (4.3)$$

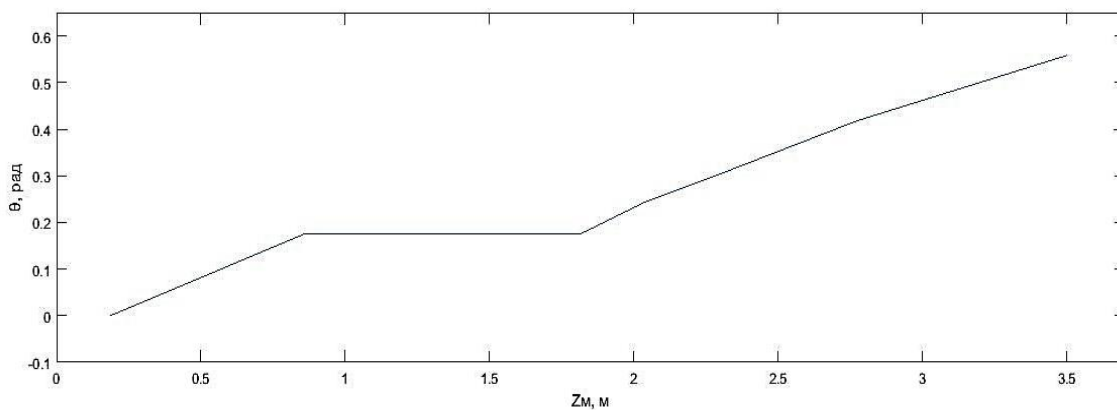


Рисунок 4.4 – График зависимости угла между спицей и присоединенной к ней оттяжкой  $\theta$  от механизма выдвижения мачты  $Z_M$

Из рисунка 4.4 видно, что зависимость угла между спицей и присоединенной к ней оттяжкой  $\theta$  от механизма выдвижения мачты  $Z_M$ , в каждый из трех периодов раскрытия рефлектора, линейная.

Данный вид зависимости обусловлен тем, что по мере раскрытия подкоса, происходит увеличение угла между спицей и присоединенной к ней оттяжкой  $\theta$ , во второй период раскрытия рефлектора дальнейшее нарастание угла  $\theta$  ограничивается фиксацией подкоса, после отсоединения подкоса, угол между спицей и оттяжкой снова продолжает увеличиваться, пока не закончится процесс раскрытия рефлектора, что можно наглядно проследить на рисунке 4.2.

Также немаловажны углом для моделирования процессов стендовых испытаний раскрытия рефлектора антенны, является угол между мачтой и оттяжкой  $\varphi$  (рис. 4.1), который изменяется в результате выдвижения мачты. По аналогичному способу с использованием приближения по методу наименьших квадратов была получена зависимость угла между мачтой и оттяжкой  $\varphi$  от механизма выдвижения мачты  $Z_M$  определяемая следующим выражением:

$$\varphi_{MC}(Z_M) = \begin{cases} -0,052 \cdot Z_M + 1,091, & \text{при } 0,2 \text{ м} \leq Z_M \leq 0,9 \text{ м} \\ -0,291 \cdot Z_M^2 + 0,229 \cdot Z_M + 1,046, & \text{при } 0,9 \text{ м} < Z_M < 2,0 \text{ м} \\ -0,108 \cdot Z_M^2 + 0,758 \cdot Z_M - 0,465, & \text{при } 2,0 \text{ м} \leq Z_M \leq 3,5 \text{ м} \end{cases} \quad (4.4)$$

Эта зависимость графически представлена на рисунке 4.5.

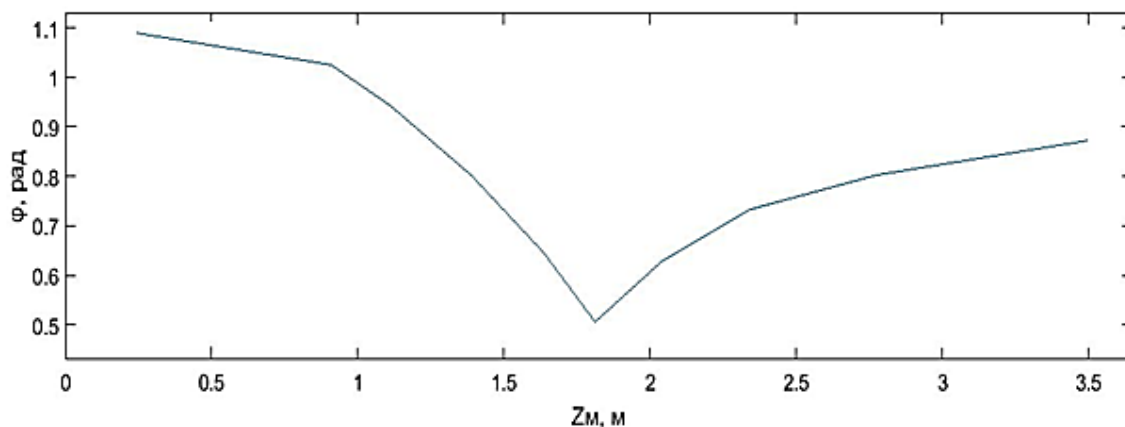


Рисунок 4.5 - График зависимости угла между мачтой и оттяжкой  $\varphi$  от механизма выдвижения мачты  $Z_M$

Полученная зависимость показала, наличие характерной «переломной» точки в момент отхода подкоса от оттяжки. [16]

Таким образом, по известным исходным данным процесса раскрытия рефлектора были выведены кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты, которые далее будут использованы при моделировании процессов стендовых испытаний раскрытия рефлектора.

#### 4.2 Определение зависимости силы тяги приложенной к мачте от угла раскрытия спицы и выдвижения мачты.

Для моделирования процессов стендовых испытаний рефлекторов антенн, помимо углов раскрытия спицы рефлектора антенны, необходимо знать, как изменяется сила тяги спицы, приложенная через ленточную оттяжку к мачте.

Баланс моментов в точке А спицы равен:

$$M_{A\Sigma} = F_T \cdot \sin \theta \cdot L_{AB} - G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC} = 0 \quad (4.5)$$

$$F_T = \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC}}{\sin \theta \cdot L_{AB}} \quad (4.6)$$

$$F_{Tz} = F_T \cdot \cos \varphi \quad (4.7)$$

Исходя из зависимостей 4.6, 4.2 - 4.4 зависимость силы тяги в оттяжке от угла раскрытия спицы определяется следующим образом:

$$F_T(\alpha) = \begin{cases} 0, & \text{при } \alpha=0 \\ \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC}}{\sin 0,174 \cdot L_{AB}}, & \text{при } 0 < \alpha < 0,872 \\ \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC}}{\sin(0,291 \cdot \alpha^2 - 0,098 \cdot \alpha + 0,103) \cdot L_{AB}}, & \text{при } 0,872 \leq \alpha \leq 1,430 \end{cases} \quad (4.8)$$

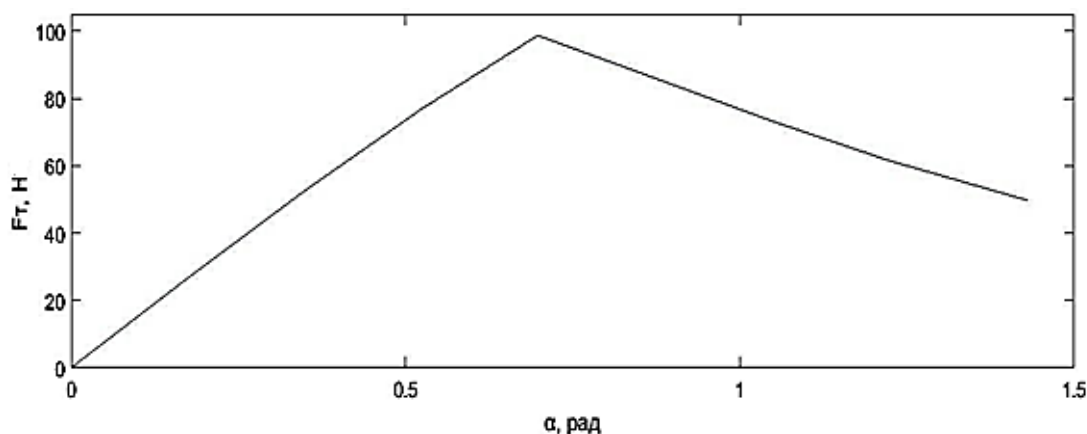


Рисунок 4.6 – График зависимости  $F_T$  от угла раскрытия спицы  $\alpha$

Аналогичным образом определяется зависимость силы тяги в оттяжке от выдвижения мачты:

$$F_T(Z_M) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \text{ м} \leq Z_M \leq 0,9 \text{ м} \\ \frac{G \cdot \sin(0,729 \cdot Z_M - 0,623) \cdot L_{AC}}{\sin 0,174 \cdot L_{AB}}, & \text{при } 0,9 \text{ м} < Z_M < 2,0 \text{ м} \\ \frac{G \cdot \sin(0,421 \cdot Z_M - 0,003) \cdot L_{AC}}{\sin(0,052 \cdot Z_M^2 - 0,041 \cdot Z_M + 0,103) \cdot L_{AB}}, & \text{при } 2,0 \text{ м} \leq Z_M \leq 3,5 \text{ м} \end{cases} \quad (4.9)$$

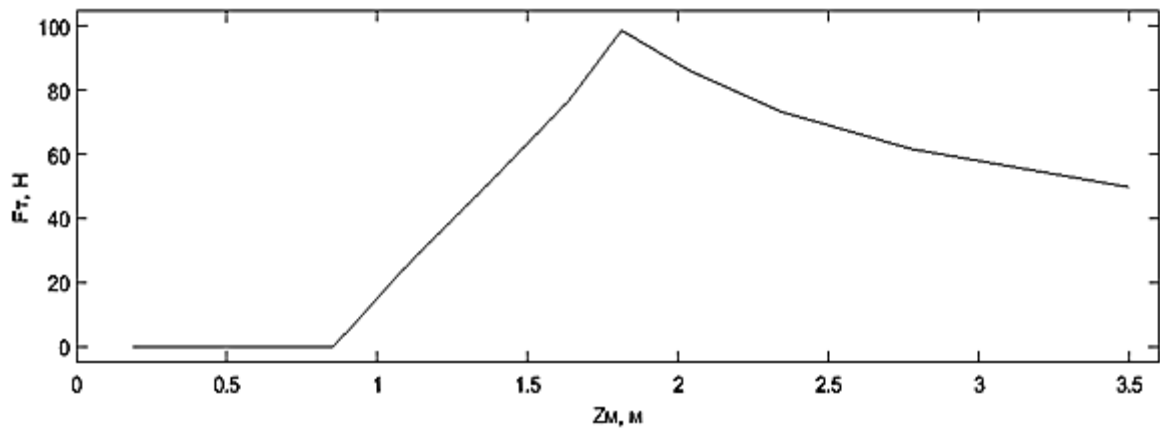


Рисунок 4.7 – График зависимости силы тяги спицы  $F_{Тз}$  от перемещения мачты  $Z_M$

Зависимость силы тяги, приложенной к мачте, от угла раскрытия спицы определяется из формул 4.7, 4.2 - 4.4 и имеет следующий вид:

$$F_{Тз}(\alpha) = \begin{cases} 0, & \text{при } \alpha=0 \\ \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC}}{\sin 0,174 \cdot L_{AB}} \cdot \cos(-0,84 \cdot \alpha + 1,09), & \text{при } 0 < \alpha < 0,872 \\ \frac{G \cdot \sin \alpha \cdot L_{AC}}{\sin(0,291 \cdot \alpha^2 - 0,098 \cdot \alpha + 0,103) \cdot L_{AB}} \cdot \cos(-0,365 \cdot \alpha^2 + 1,274 \cdot \alpha - 0,205), & \text{при } 0,872 \leq \alpha \leq 1,430 \end{cases} \quad (4.10)$$

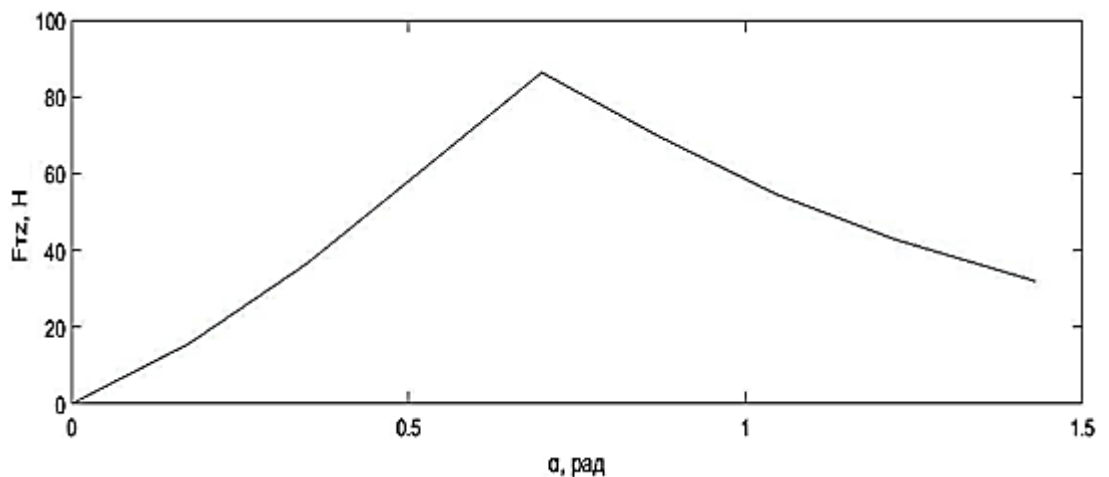


Рисунок 4.8 – График зависимости силы тяги спицы  $F_{Тз}$  от угла раскрытия спицы  $\alpha$

Аналогичным образом определяется зависимость силы тяги, приложенной к мачте, от перемещения мачты:

$$F_{Tz}(Z_M) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \text{ м} \leq Z_M \leq 0,9 \text{ м} \\ \frac{G \cdot \sin(0,729 \cdot Z_M - 0,623) \cdot L_{AC}}{\sin 0,174 \cdot L_{AB}}, & \\ \cdot \cos(-0,291 \cdot Z_M^2 + 0,229 \cdot Z_M + 1,046), & \text{при } 0,9 \text{ м} < Z_M < 2,0 \text{ м} \\ \frac{G \cdot \sin(0,421 \cdot Z_M - 0,003) \cdot L_{AC}}{\sin(0,052 \cdot Z_M^2 - 0,041 \cdot Z_M + 0,103) \cdot L_{AB}}, & \\ \cdot \cos(-0,108 \cdot Z_M^2 + 0,758 \cdot Z_M - 0,465), & \text{при } 2,0 \text{ м} \leq Z_M \leq 3,5 \text{ м} \end{cases} \quad (4.11)$$

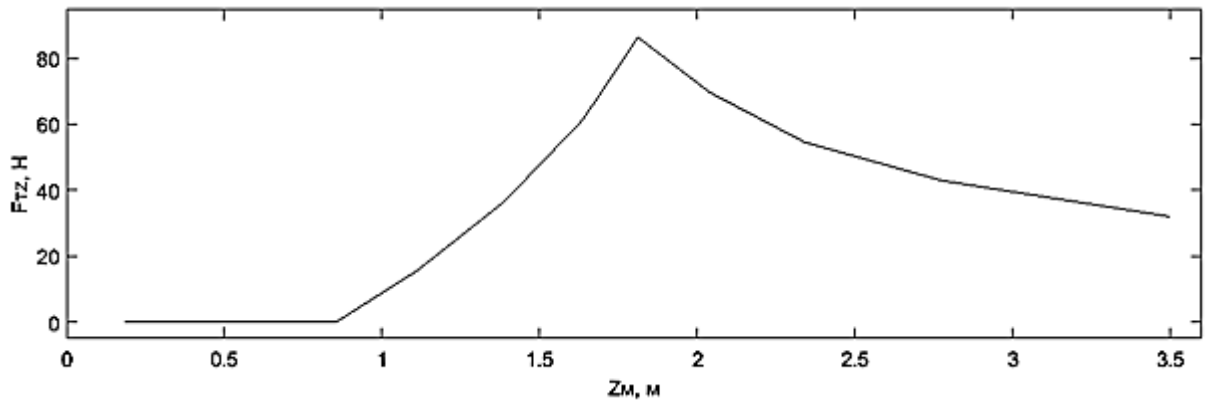


Рисунок 4.9 – График зависимости силы тяги спицы, приложенной к мачте  $F_{Tz}$  от перемещения мачты  $Z_M$

Таким образом, вывод этих зависимостей необходим для моделирования нагрузочного момента, создаваемого на двигателе в процессе раскрытия спицы и сравнения силы тяги спицы, формируемой системой с данными, полученными аналитическим путем.



## **5. Математическое моделирование процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн**

### **5.1. Структура математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн**

Математическую модель, описывающую процесс раскрытия рефлектора антенны на разрабатываемом стенде, на первых стадиях ее составления и исследования целесообразно формировать в виде объединения однотипных математических моделей процессов раскрытия каждой из спиц рефлектора.

В свою очередь каждая из указанных математических моделей раскрытия какой-либо спицы будет представлять собой объединение двух математических моделей:

- математической модели процесса раскрытия спицы рефлектора его штатным приводом (электроприводом механизма выдвижения мачты), отражающей структуру и параметры кинематической цепи и вход-выходные отображения всех входящих в нее элементов и устройств;
- математической модели той части системы активного обезвешивания, реализуемой в стенде, которая используется для обезвешивания данной спицы.

### **5.2. Математическое моделирование процессов раскрытия спиц рефлектора антенны в земных условиях**

Раскрытие всех спиц в рефлекторе антенны осуществляется однотипно. Кинематические схемы их раскрытия имеют одинаковую структуру и параметры. Раскрытие происходит с помощью установленного в корпусе (основании) антенны механизма выдвижения мачты (МВМ), электродвигатель в котором связан через зубчатый и шнековый редуктор с выдвигаемой им мачтой (рис. 5.1). На вершине мачты закреплены ленточные тяги (оттяжки) из углеволокна, вторые концы которых жестко крепятся на

спице. Для снижения сопротивления натяжению туг на начальном этапе раскрытия спиц, под каждой из них располагаются две роликовые опоры, одна из которых размещена на верхней части МВМ, а вторая – на подкосе, специально шарнирно закрепленном на спице и раскрывающемся под действием тяги до начала ее разворота. Эти подкосы служат для обеспечения более высоких уровней моментов от сил натяжения туг при малых углах раскрытия спиц. В дальнейшем, при достижении углом разворота спицы некоторого угла  $\alpha_{\text{нм}}$  туги отходят от роликовых опор и те уже не определяют их текущее положение. [17]

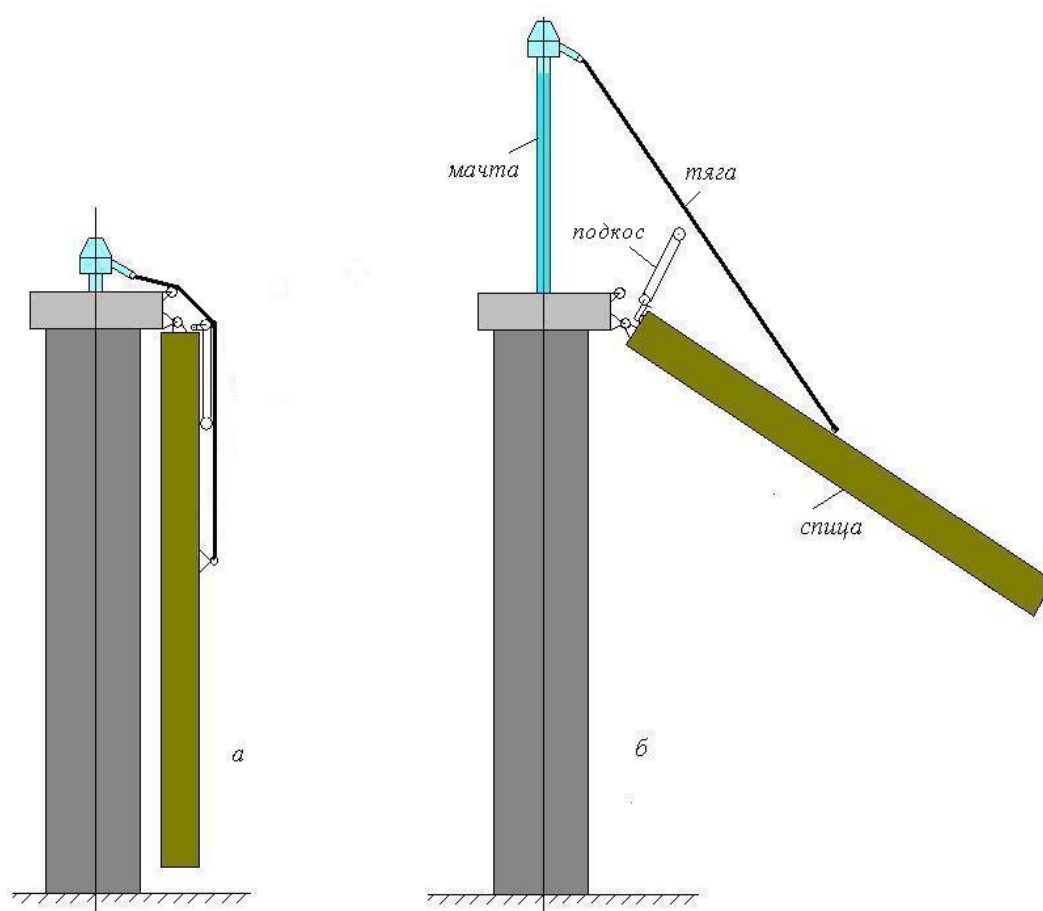


Рисунок 5.1 - Положение спицы рефлектора до начала ее раскрытия (а) и в промежуточном положении (б) в процессе раскрытия

Математическая описание процессов раскрытия спиц рефлекторов антенн сводится к описанию процесса поворота спиц, работы электропривода

их раскрытия и его динамических связей через мачту и тяги со спицами. В испытуемых на стенде рефлекторах антенн привод всех спиц фактически одинаков. Поэтому на первых этапах ее составления и исследования можно рассматривать привод какой-либо одной спицы и ее развороты под действием этого привода. Нагрузка на электродвигатель привода будет равна его нагрузке, связанной с раскрытием одной спицы, умноженной на число раскрываемых спиц в рефлекторе.

Последнее допущение (об идентичности нагрузки на привод механизма выдвижения мачты от всех спиц рефлектора) является некоторым приближением, связанным с использованием в рефлекторах антенн больших диаметров одной из спиц, через которую рефлектор антенны связан с корпусом космического аппарата, другого исполнения и веса, по сравнению с остальными.

Исходная расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора в земных условиях приведена на рис. 5.2.

Из этой схемы видно, что основным уравнением, описывающим раскрытие какой-либо спицы при ее одностержневом исполнении (без обезвешивания), будет следующее уравнение баланса приложенных к ней моментов:

$$J_{c_{пр}} \cdot \frac{d\omega_c}{dt} = M_{сд}(t) - M_{сG}(t) \quad (5.1)$$

В этом уравнении приняты следующие условные обозначения:

$J_{c_{пр}}$  – приведенный к центру  $A$  шарнирного сочленения спицы с основанием антенны момент инерции спицы и вращающихся вместе с ней других частей рефлектора и отражателя антенны;

$\omega_c$  – угловая скорость раскрытия спицы;

$M_{сд}$  – приложенный к спице через ленточную оттяжку момент вращения от механизма выдвижения мачты;

$M_{сG}$  – момент вращения спицы, обусловленный ее весом.

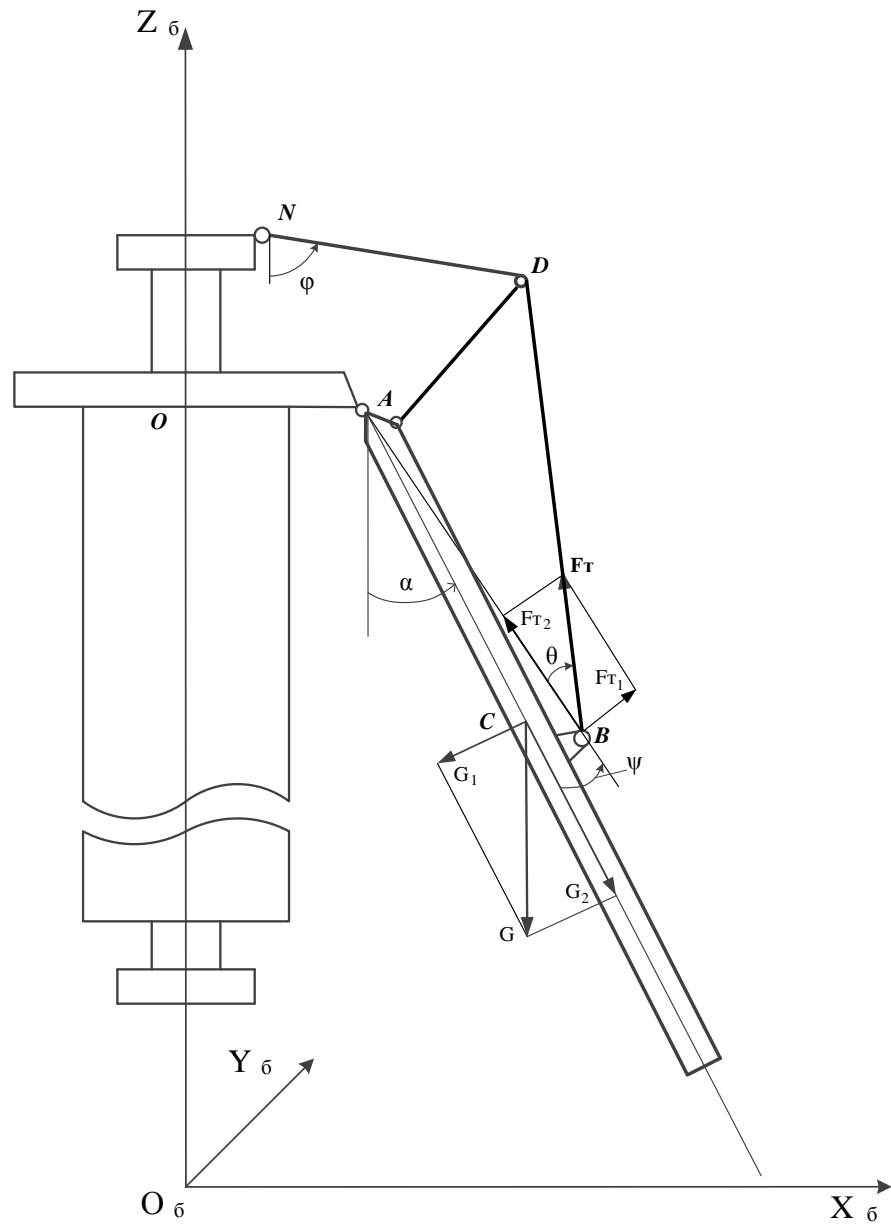


Рисунок 5.2 - Расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора антенны в земных условиях

Расчетные значения выше перечисленных моментов  $M_{сд}$ ,  $M_{сG}$  имеют следующий вид:

$$M_{сд}(t) = F_{T1}(t) \cdot L_{AB}; \quad (5.2)$$

$$M_{сG} = G_1 \cdot L_{AC}. \quad (5.3)$$

В уравнениях (5.2) - (5.3) использованы следующие условные обозначения:  $L_{AB}$  – длина отрезка  $AB$  от оси шарнира  $A$  до точки закрепления на спице ее оттяжки;  $L_{AC}$  – длина отрезка  $AC$  от оси шарнира до центра масс спицы.

Приведенный момент инерции спицы  $J_{c_{пр}}$  был определен в программной среде Autodesk Inventor Professional 2015 благодаря наличию 3D модели рефлектора и равен  $J_{c_{пр}} = 18,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  (рис. 5.3).

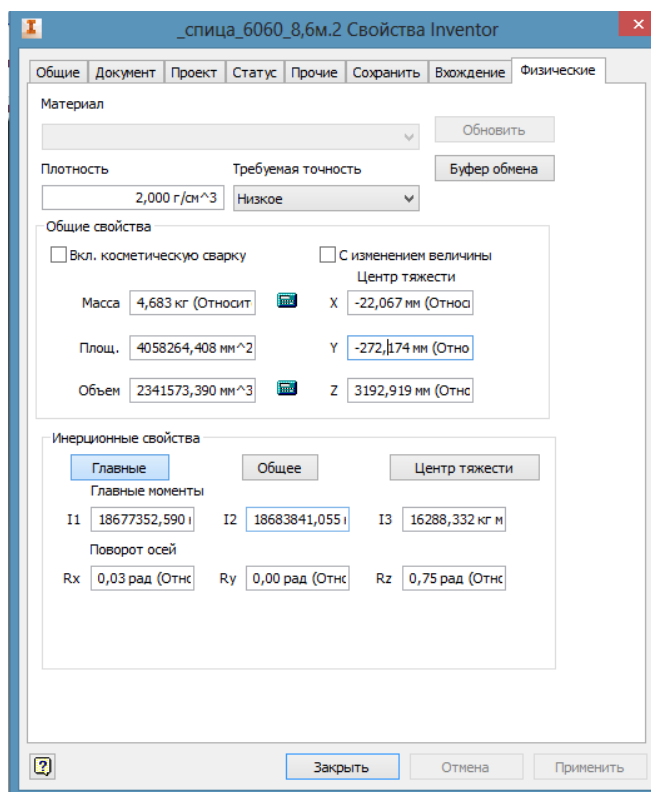


Рисунок 5.3 – Определение момента инерции спицы в программной среде Autodesk Inventor Professional 2015

Угол раскрытия спицы  $\alpha$  будет определяться по известной формуле его связи с угловой скоростью ее поворота:

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega_c(t) \cdot dt, \quad (5.4)$$

Опишем далее математически процессы, протекающие в механизме выдвижения мачты и в тяговом сочленении мачты со спицей. Они будут описываться как совокупность процессов:

- протекающих в электродвигателе и связанном с ним шнеком;
- связанных с перемещением мачты;
- связанных с передачей через ленточную оттяжку создаваемого МВМ тягового усилия  $F_{T_z}$  с усилием  $F_T$ , прикладываемым к раскрываемой спице.

Полагаем, что используемый в приводе механизма выдвижения мачты бесконтактный двигатель постоянного тока ДБ25-11-6 описываются следующими уравнениями:

- уравнением баланса моментов на валу приводного двигателя:

$$J_{\text{дмпр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{дм}}}{dt} = M_{\text{дм}}(t) - M_{\text{с}_{\text{дм}\Sigma}}(t). \quad (5.5)$$

В этом уравнении приняты следующие обозначения:

$J_{\text{дмпр}}$  – приведенный к валу двигателя момент инерции его ротора и сочлененных с ним зубчатого редуктора и шнека МВМ;

$\omega_{\text{дм}}$  – угловая скорость вращения вала двигателя;

$M_{\text{дм}}$  – движущий момент, развиваемый двигателем на своем валу;

$M_{\text{с}_{\text{дм}\Sigma}}$  – суммарный момент сил сопротивления вращению ротора двигателя, приведенный к его валу;

- уравнением связи угла поворота ротора двигателя  $\alpha_{\text{д}}$  с его угловой скоростью  $\omega$ :

$$\varphi_{\text{дм}}(t) = \int_0^t \omega_{\text{дм}}(t) \cdot dt \quad (5.6)$$

- уравнением электрического равновесия двигателя:

$$U_{\text{дм}}(t) = R_{\text{дм}} \cdot I_{\text{дм}}(t) + L_{\text{дм}} \frac{dI_{\text{дм}}}{dt} + E_{\text{дм}}(t), \quad (5.7)$$

где

$U_{\text{дм}}(t)$  – текущее значение электрического напряжения, подводимого к электродвигателю от его системы управления;

$I_{\text{дм}}(t)$  – текущее значение тока в обмотке ротора двигателя;

$R_{\text{дм}}, L_{\text{дм}}$  – соответственно, активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора;

$E_{\text{дм}}(t)$  – текущее значение противо-ЭДС;

▪ зависимостью развиваемого двигателем на своем валу момента с током в обмотке ротора:

$$M_{\text{дм}}(t) = c_{M_{\text{дм}}} \cdot I_{\text{дм}}(t), \quad (5.8)$$

▪ а также зависимостью противо-ЭДС двигателя от скорости вращения его ротора:

$$E_{\text{дм}}(t) = c_{e_{\text{дм}}} \cdot \omega_{\text{дм}}(t), \quad (5.9)$$

Большинство параметров двигателя, входящих в описывающие его уравнения, не удалось найти по научно-технической литературы, получить от заказчика ОКР. Поэтому при моделировании процессов раскрытия рефлекторов антенн на создаваемом стенде предлагается упростить математическое описание двигателя следующим образом (рис.5.4):

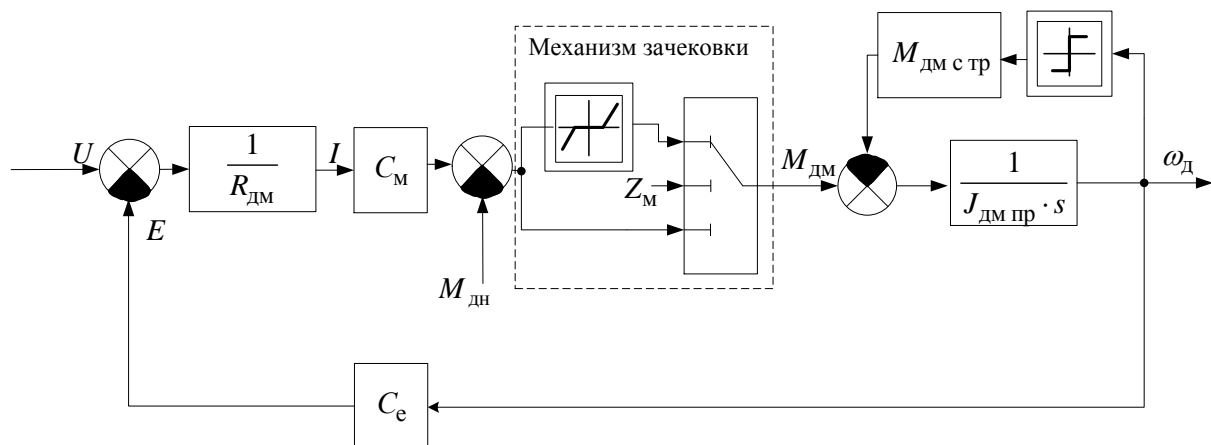


Рисунок 5.4 – Операторно-структурная схема двигателя постоянного тока с зачековкой

Зачековка двигателя в механизме выдвижения мачты происходит для ограничения последующего выдвижения мачты при достижении рефлектором своего рабочего положения, путем создания на валу двигателя момента, ограничивающего его вращение.

Параметры для моделирования работы двигателя ДБ25-11-6:

- напряжение питания  $U = 27$  В;
- номинальный ток  $I = 0,5$  А;
- частота вращения вала двигателя – 6000 об/мин;
- активное сопротивление обмотки ротора  $R_{\text{дм}} = 1$  Ом;
- постоянный коэффициент двигателя  $C_{\text{м}} = 0,035$ ;
- постоянный коэффициент определяемой конструкцией двигателя

$C_{\text{е}} = 0,043$ . [18]

Момент инерции приведенный к валу электродвигателя:

$$J = J_p + (m_{\text{м}} + m_{\text{с1}} \cdot N_{\text{с}}) \cdot \left( \frac{V}{\omega_{\text{д}}} \right)^2, \quad (5.10)$$

$$J = 0,000392 + (10 + 4,7 \cdot 7 + 10) \cdot \left( \frac{0,002}{628} \right)^2 \approx 0,000375 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5.11)$$

Момент сопротивления приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{дн}}(t) = \frac{F_{\text{м}}(t) \cdot V}{\omega_{\text{д}} \cdot \eta}, \quad (5.12)$$

$$F_{\text{м}}(t) = F_{\text{Тz}}(t) \cdot N_{\text{с}} + G_{\text{м}}, \quad (5.13)$$

Где  $F_{\text{м}}$  - сила прикладываемая к мачте

$F_{\text{Тz}}$  - проекция силы тяги на ось z, меняется в зависимости от угла

раскрытия спицы и определяется выведенной ранее зависимостью;

$G_{\text{м}}$  - сила тяжести мачты;

$N_{\text{с}}$  - количество спиц;

$V$  - скорость выдвижения мачты.



Полагаем, что подаваемое на электродвигатель МВМ типа ДБ25-11-6 напряжение питания формируется в соответствии с принятым алгоритмом управления

$$U_{\text{дм}}(t) = f(\omega_{\text{дмзад}}), \quad (5.14)$$

где  $\omega_{\text{дмзад}}$  – заданная угловая скорость ротора электродвигателя.

Вполне вероятно, что этот алгоритм при практической реализации принимается в виде:

$$U_{\text{дм}}(t) = K_{\text{удм}} \cdot \omega_{\text{дмзад}}. \quad (5.15)$$

Определим суммарный момент сопротивления на валу двигателя  $M_{\text{с}_{\text{дм}\Sigma}}$ . Он складывается из момента сухого трения  $M_{\text{дмс}_{\text{тр}}}(t)$ , который опишем традиционно в виде:

$$M_{\text{дмс}_{\text{тр}}}(t) = M_{\text{дмс}_{\text{тр. макс}}} \cdot \text{sign } \omega_{\text{дм}}(t), \quad (5.16)$$

и момента нагрузки  $M_{\text{дн}}(t)$  от приводимой в движение мачты МВМ и спиц, который может быть аналитически определен из условия баланса мощности, электродвигателя, определяемой на его валу, и на движении мачты.

Мощность двигателя на валу

$$N_{\text{дм}}(t) = M_{\text{дм}}(t) \cdot \omega_{\text{дм}}(t) = M_{\text{дм}}(t) \cdot \frac{d\phi_{\text{дм}}}{dt}. \quad (5.17)$$

Мощность, характеризующую линейное перемещение мачты МВМ, можно определить как

$$N_{\text{лин}}(t) = F_{\text{м}}(t) \cdot \frac{dz_{\text{м}}(t)}{dt}, \quad (5.18)$$

где  $F_{\text{м}}$  – сила, прикладываемая к мачте от электродвигателя;  $z_{\text{м}}$  – перемещение мачты.

Если принять коэффициент полезного действия редукторной связи электродвигателя с мачтой МВМ равным  $\eta$ , то баланс мощностей  $N_{вр}(t)$  и  $N_{лин}(t)$  будет описан уравнением:

$$\eta_{ред} \cdot N_{вр}(t) = N_{лин}(t), \quad (5.19)$$

или, что равносильно, уравнением

$$\eta_{ред} \cdot M_{дм}(t) \cdot \frac{d\varphi_{дм}}{dt} = F_M(t) \cdot \frac{dz_M(t)}{dt}. \quad (5.20)$$

Отсюда получаем

$$F_M(t) = \eta_{ред} \cdot M_{дм}(t) \cdot \frac{d\varphi_{дм}}{dz_M} = M_{дм}(t) \cdot \eta_{ред} / K_{дм}, \quad (5.21)$$

где

$$K_{дм} \triangleq \frac{dz_M}{d\varphi_{дм}} \quad (5.22)$$

– коэффициент редукции от угла поворота  $\varphi_D$  вала двигателя к перемещению  $z_M$  мачты МВМ, определяемый из проектной документации рефлектора антенны.

Известно, что шнек совершает один оборот за то же время, за которое двигатель ДБ25-11-6 совершает 2550,069 оборотов, а за один оборот шнека мачта выдвигается на 50 мм.

Из этих данных следует, что коэффициент передачи между двигателем и шнеком равен:

$$K_{дш} = \frac{1}{2550,069} \approx 0,000392 \quad (5.23)$$

Коэффициент передачи между шнеком и мачтой равен:

$$K_{шм} = \frac{0,05}{6,283} \approx 0,00796 \text{ м/рад} \quad (5.24)$$

Тогда коэффициент передачи между двигателем и мачтой можно определить следующим образом:

$$K_{дм} = K_{дш} \cdot K_{шм} = 0,000392 \cdot 0,00796 \approx 0,00000312 \text{ м/рад}, \quad (5.25)$$

а скорость выдвижения мачты равна:

$$V = \omega_{\text{д}} \cdot K_{\text{дм}} = 628 * 0,00000312 = 0,002 \text{ м/с} \quad (5.26)$$

Связь перемещения мачты в процессе раскрытия рефлектора с углом поворота ротора электродвигателя будет определяться соотношением

$$\Delta z_{\text{м}} = K_{\text{дм}} \cdot \Delta \varphi_{\text{дм}}, \quad (5.27)$$

где  $z_{\text{м}}$  – перемещение мачты;  $K_{\text{дм}}$  – коэффициент передачи между двигателем и мачтой, измеряемый в м/рад.

В свою очередь угол разворота (раскрытия) спицы  $\alpha$  связан через ленточную оттяжку, используемую для раскрытия спицы, с перемещением мачты  $z_{\text{м}}$  уравнением:

$$\alpha = K_{\text{мс}} \cdot z_{\text{м}}, \quad (5.28)$$

где  $K_{\text{мс}}$  – коэффициент передачи между перемещением мачты и углом раскрытия спицы. Следует заметить, что  $K_{\text{мс}}$  в процессе раскрытия спицы не будет все время оставаться постоянной величиной. Его аналитическая зависимость от угла раскрытия  $\alpha$  была определена ранее (4.2).

Параметры рефлекторов и стенда с активной системой его обезвешивания, которые необходимы для ее использования, могут быть получены из конструкторской документации на рефлектор и стенд.

Численные значения расчетных масс и расчетных расстояний до центров масс спиц рефлектора 14Ф151.2850-0: сечение спицы 140x80 мм масса не более 4,7 кг, длина до центра масс  $3175 \pm 100$  мм, длина спицы 6113 мм.

Механизм выдвижения мачты имеет массу 10 кг.

При верификации представленной на рис. 5.7 операторно-структурной схема системы раскрытия спицы рефлектора были использованы параметры, соответствующие антенне с диаметром рефлектора 8,6 метра. Они отражены частично на конструкторских чертежах рефлектора этой антенны, представленных на рисунках 5.5 и 5.6.

Размеры верхней части мачты и относительное положение к ней спиц и креплений их оттяжек при транспортировочном состоянии рефлектора (в начале его раскрытия на стенде) приведены на рисунке 5.5.

Все эти данные были учтены при моделировании системы раскрытия спицы рефлектора в земных условиях (рис. 5.8).

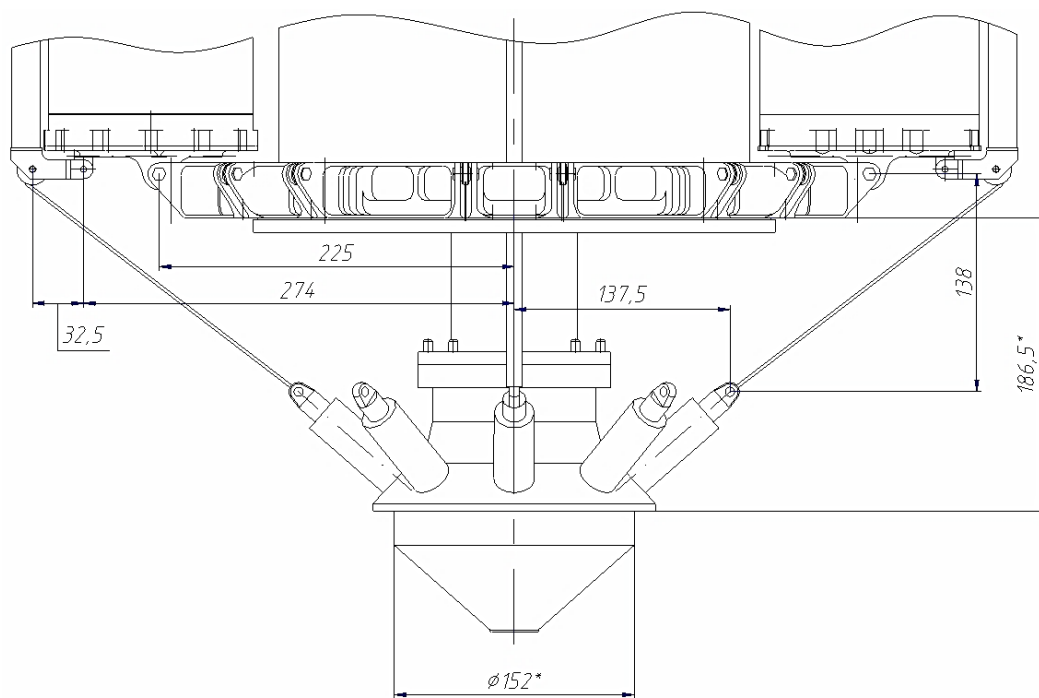


Рисунок 5.5 - Параметры рефлектора антенны диаметром 8,6 метра в зоне крепления спиц к мачте МВМ

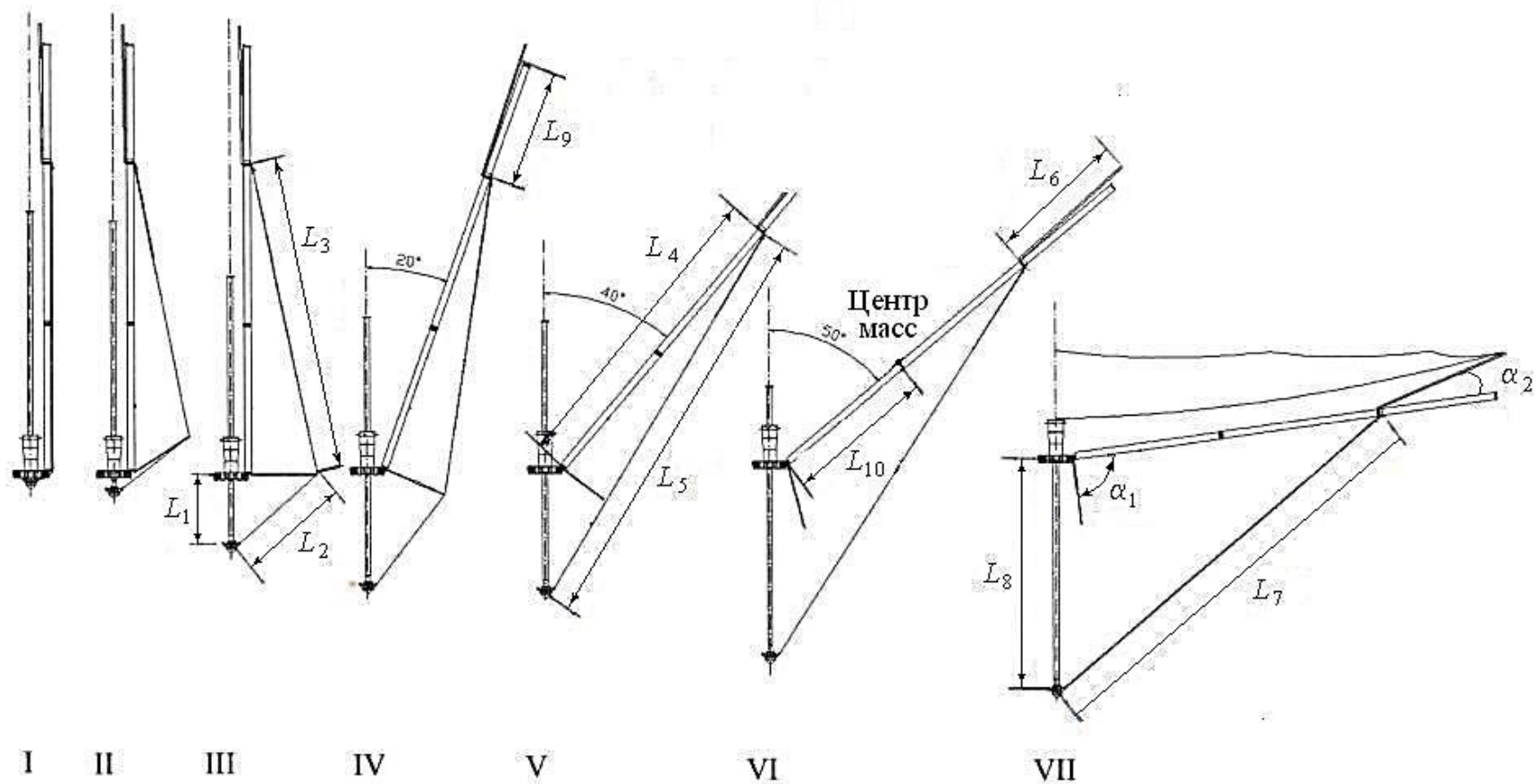
Указанные на рисунке 5.6 линейные параметры для рефлектора диаметром 8,6 метра имеют следующие значения (в миллиметрах) :

$$L_1 = 1000; L_2 = 1318; L_3 = 5317; L_4 = 5000; L_5 = 6500;$$

$$L_6 = 1450; L_7 = 6500; L_8 = 3500; L_9(\text{штанга}) = 1475;$$

$$L_9(\text{спица}) = 1200, \text{ а угловые параметры } \alpha_1 = 98^0; \alpha_2 = 35^0.$$

Более подробная схема моделирования стендовых испытаний процесса раскрытия рефлектора антенн в земных условия, без обезвешивания спиц, представлена в приложении А.



I- транспортировочное положение, II- начало движения мачты, III- фиксация подкоса, IV- поворот спицы, V- отход оттяжки от подкоса, VI- промежуточное положение, VII- рабочее положение

Рисунок 5.6 - Конструктивные параметры спицы рефлектора диаметром 8,6 метра

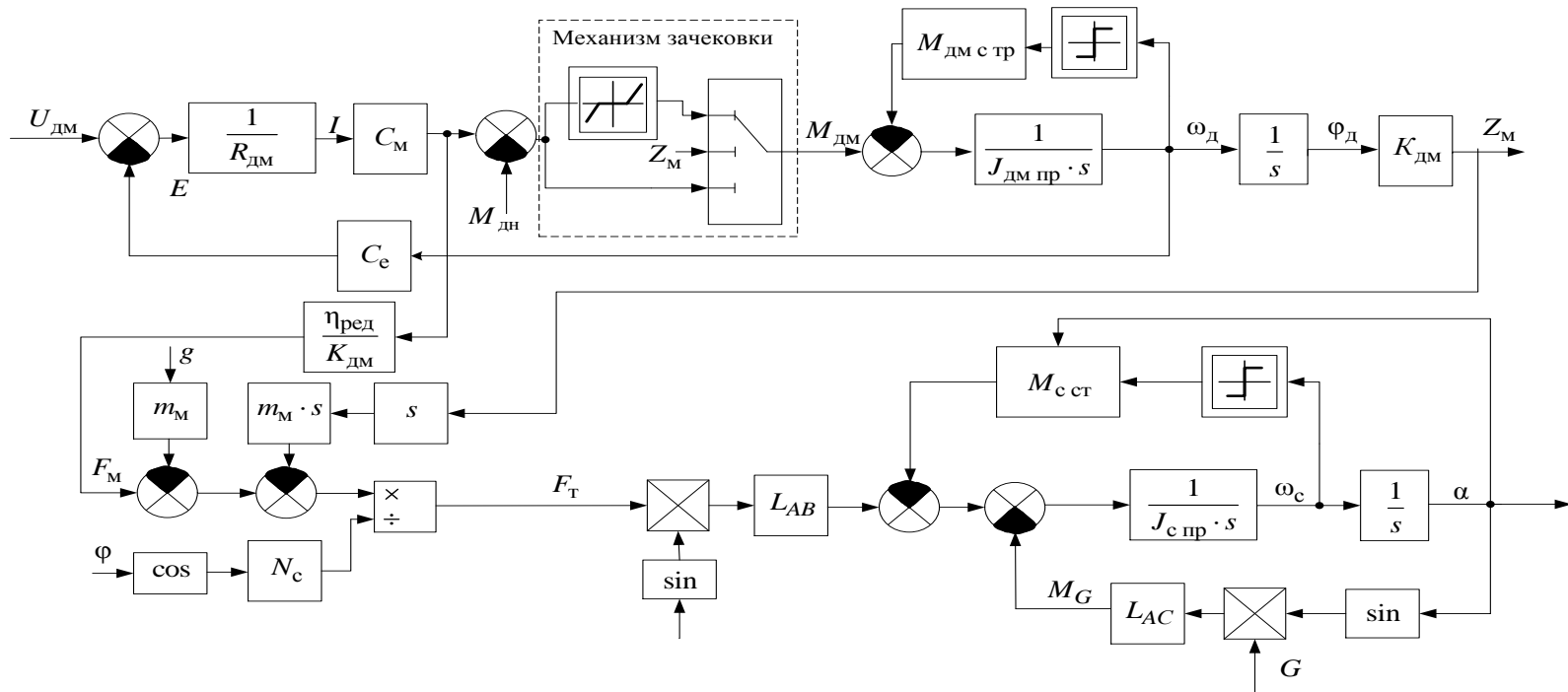


Рисунок 5.7 - Операторно-структурная схема системы раскрытия спицы рефлектора в земных условиях

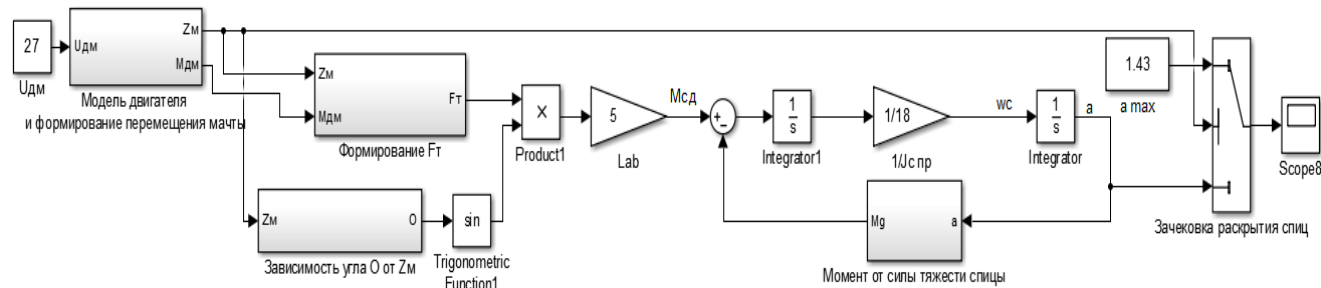


Рисунок 5.8 - Моделирование системы раскрытия спицы рефлектора в земных условиях

### 5.3 Графики, полученные в результате моделирования раскрытия спиц рефлектора антенны в земных условиях

Для проверки правильности работы модели необходимо сравнить результаты моделирования системы с зависимостями выведенными аналитически.

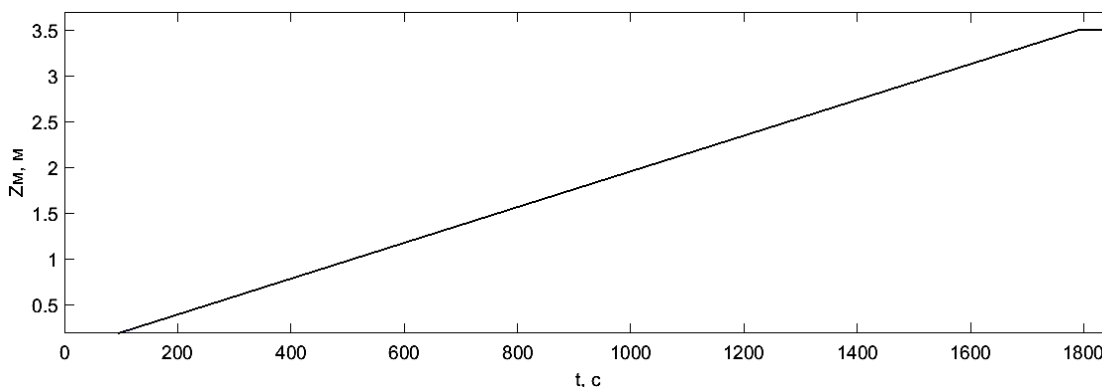


Рисунок 5.9 – График перемещения мачты  $Z_M$  с течением времени

График перемещения мачты показал, что мачта перемещается до 3,5 м за 1790 секунд (29,83 минуты), что на 4,8 секунд дольше, чем заданное время выдвигения мачты, ввиду малого значения погрешности, можно принять полученный результат за достоверный.

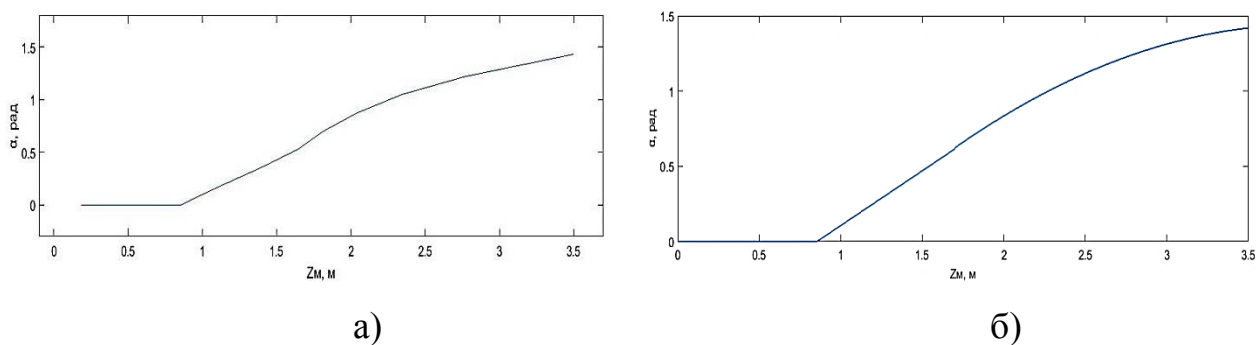
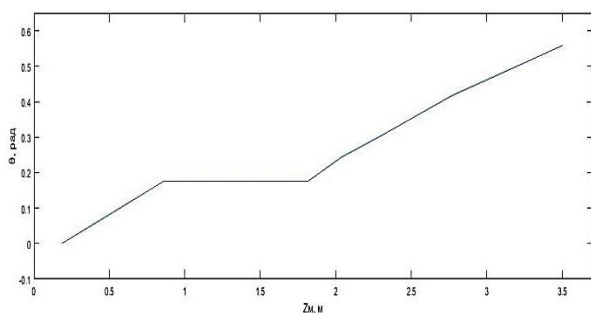
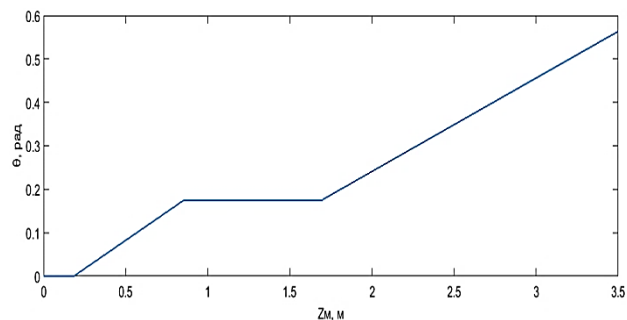


Рисунок 5.10 – График зависимости угла раскрытия спицы  $\alpha$  от перемещения мачты: а) график, выведенный аналитически, б) график, полученный при моделировании



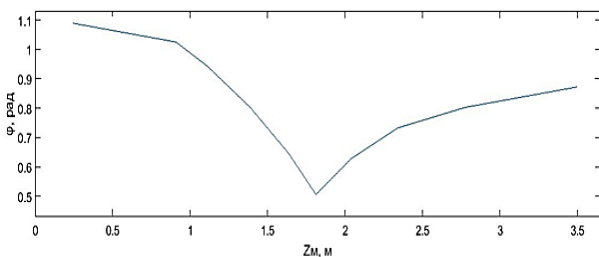
а)



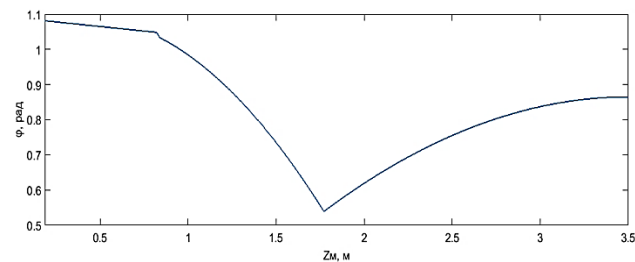
б)

Рисунок 5.11 – Графики зависимости угла между оттяжкой и спицей  $\theta$  от перемещения мачты: а) график, выведенный аналитически, б) график, полученный при моделировании

Из рисунка 5.11 видно, что незначительное различие между графиками наблюдается только в третий период раскрытия рефлектора, график с модели более линеаризован на этом участке.



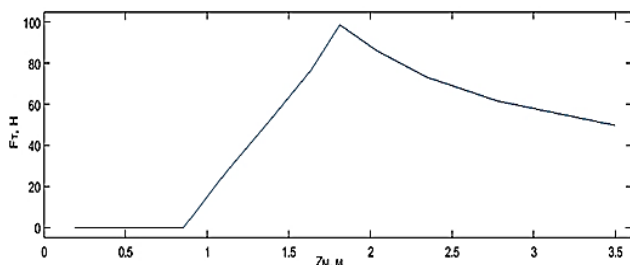
а)



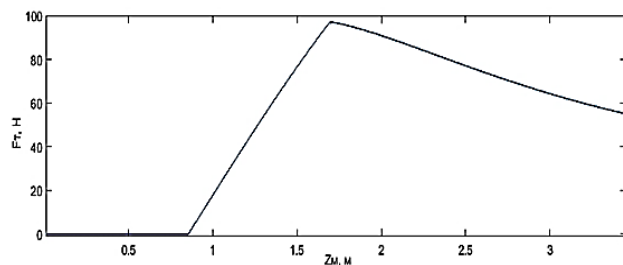
б)

Рисунок 5.12 – График зависимости угла между оттяжкой и мачтой  $\varphi$  от перемещения мачты: а) график, выведенный аналитически, б) график, полученный при моделировании

Как и в предыдущем случае, сравнение графиков показало незначительное расхождение в третий период раскрытия рефлектора.



а)



б)



Рисунок 5.13 – Графики зависимости силы тяги  $F_T$  от перемещения мачты: а) график, выведенный аналитически, б) график, полученный при моделировании

Как видно, данные графики имеют схожие значения силы тяги на соответствующих моментах перемещения мачты, только график, полученный при моделировании, более линейаризован.

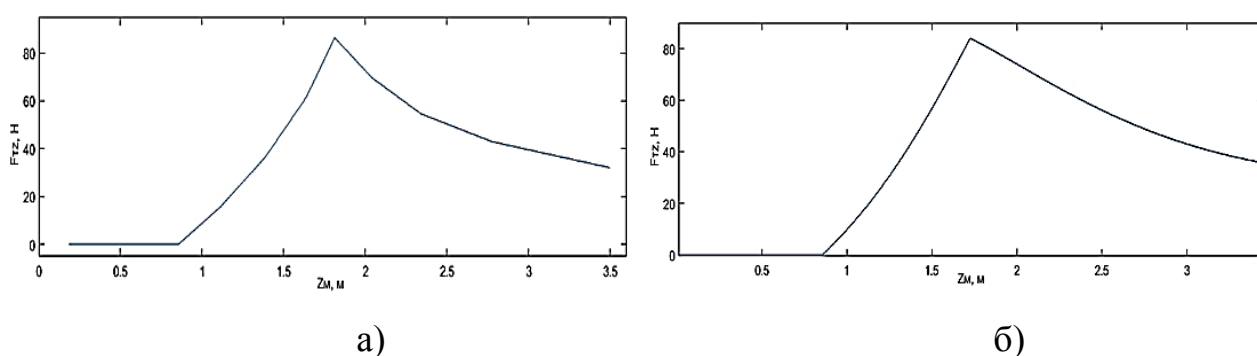


Рисунок 5.14 – Графики зависимости силы тяги приложенной через ленточную оттяжку от спицы к мачте  $F_{Tz}$  от перемещения мачты: а) график, выведенный аналитически, б) график, полученный при моделировании

Как и в предыдущем случае, видно, что различия этих график несущественны и не оказывают существенного влияния на процесс моделирования.

Таким образом, погрешность между зависимостями углов от перемещения мачты, выведенными аналитически и снятыми с модели составляют сотые доли радиан, также как и погрешность между сравниваемыми графиками силы тяги, поэтому можно считать, что собранная модель адекватно отражает поведение спицы при раскрытии рефлектора в земных условиях.

#### 5.4 Математическое моделирование процессов раскрытия спиц рефлекторов антенн в условиях имитации невесомости

Обезвешивание спицы рефлектора антенны осуществляется посредством механической силокомпенсирующей системы, состоящей из кареток и тросового подвеса с регулируемой силой его натяжения.

Исходная расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора приведена ниже на рис. 5.15. Она ориентирована на вариант вывески спиц не в центрах их масс. Это сделано для общности математического описания процесса раскрытия спиц рефлектора (и их звеньев) для подобной вывески спиц и подвеса их в стенде за центры масс. В частности, вполне возможно, что в дальнейшем на создаваемом стенде для наземных испытаний раскрытия рефлекторов антенн больших диаметров будут ситуации, когда приводы звеньев спиц (а возможно, что и сами спицы) будут иметь другие приводы раскрытия или их конструктивные исполнения не позволят реализовать их вывеску на стенде за центры масс.

При втором варианте подвеса спиц уравнения, описывающие процесс их раскрытия, будут получены как частный случай путем совмещения точки вывески спицы с ее центром масс.

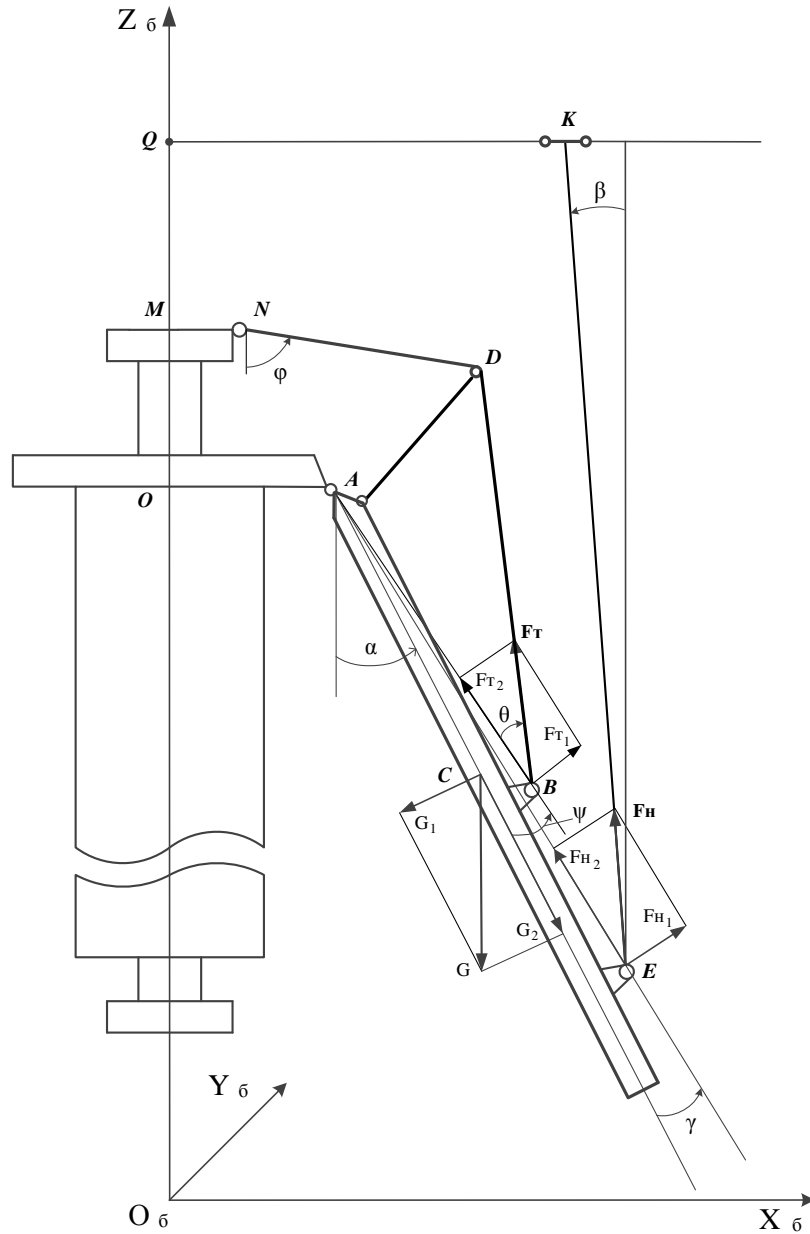


Рисунок 5.15 - Расчетная схема для математического описания процесса раскрытия спицы рефлектора

Из рисунка 5.15 видно, что уравнение (5.1), описывающее раскрытие одностержневой спицы примет следующий вид:

$$J_{с_{пр}} \cdot \frac{d\omega_c}{dt} = M_{сд}(t) + M_{с_{F_H}}(t) - M_{с_G}(t) - M_{с_{ст}}(t). \quad (5.29)$$

В этом уравнении приняты следующие условные обозначения:

$J_{\text{сnp}}$  – приведенный к центру  $A$  шарнирного сочленения спицы с основанием антенны момент инерции спицы и вращающихся вместе с ней других частей рефлектора и отражателя антенны;

$\omega_c$  – угловая скорость раскрытия спицы;

$M_{\text{сд}}$  – приложенный к спице через ленточную оттяжку момент вращения от механизма выдвижения мачты;

$M_{\text{с}_{F_H}}$  – приложенный к спице через трос ее вывески момент от системы автоматического управления натяжением троса;

$M_{\text{с}_G}$  – момент вращения спицы, обусловленный ее весом;

$M_{\text{с}_{\text{ст}}}$  – момент от сухого трения в сочленении спицы с основанием антенны.

Расчетные значения выше перечисленных моментов  $M_{\text{сд}}$ ,  $M_{\text{с}_{F_H}}$ ,  $M_{\text{с}_G}$  имеют следующий вид:

$$M_{\text{сд}}(t) = F_{T_1}(t) \cdot L_{AB}; \quad (5.30)$$

$$M_{\text{с}_{F_H}}(t) = F_{H_1}(t) \cdot L_{AE}. \quad (5.31)$$

$$M_{\text{с}_G} = G_1 \cdot L_{AC}. \quad (5.32)$$

В уравнениях (5.30) – (5.32) использованы следующие условные обозначения:  $L_{AB}$  – длина отрезка  $AB$  от оси шарнира  $A$  до точки закрепления на спице ее оттяжки;  $L_{AE}$  – длина отрезка  $AE$  от оси шарнира до точки подвеса спицы на тросе;  $L_{AC}$  – длина отрезка  $AC$  от оси шарнира до центра масс спицы.

Момент сухого трения в шарнире крепления спицы на основании антенны примем в дальнейшем в виде:

$$M_{\text{с}_{\text{ст}}}(t) = M_{\text{с}_{\text{ст}}}(t) \cdot \text{sign } \omega_c(t). \quad (5.33)$$

Этот момент в процессе раскрытия спицы может меняться из-за невыполнения условия абсолютной инвариантности и изменения в процессе

раскрытия спицы составляющей  $F_{T1}$  силы тяги, прикладываемой к спице через оттяжку от механизма выдвижения мачты. Аналитический расчет текущих значений  $M_{сст}$  для его учета при моделировании процесса раскрытия спиц рефлектора антенны на стенде крайне сложен (а скорее всего, с необходимой точностью и не возможен). Поэтому требуется провести предварительные эксперименты для определения зависимости  $M_{сст}$  от вектора силы давления  $F_A$  со стороны спицы на ее шарнирное соединение с корпусом рефлектора антенны в различных ее положениях и при разных величинах  $F_A$ .

Идеализирование подсистем САУ НТ и ССК заключается в замене САУ НТ звеном с коэффициентом равным единице, т.е.  $F_{зад} = F_H$  и замене ССК идеализированной подсистемой с принятой погрешностью отклонения троса от своего вертикального положение, равной 2 процента. Тогда с учетом высоты потолка в цехе АО «ИСС» угол отклонения троса от вертикального положения будет рассчитываться следующим образом:

$$\Delta x = x_E - x_H, \quad (5.34)$$

$$\beta = \arctg \frac{\Delta x}{L_{AH}}, \quad (5.35)$$

$$L_{EH} = L_{AH} + L_{AE} \cdot \cos \alpha, \quad (5.36)$$

$$\beta = \arctg \frac{\Delta x}{L_{AH} + L_{AE} \cdot \cos \alpha}, \quad (5.37)$$

где  $x_E$  - проекция на ось  $x$  точки крепления троса;

$x_H$  - проекция на ось  $x$  положения каретки;

$L_{AE}$  - расстояние от точки крепления троса до шарнира спицы по вертикали;

$L_{AH} = 4\text{м}$  – расстояние от шарнира спицы до положения каретки по вертикали.

Операторно-структурная схема системы раскрытия спицы рефлектора при ее обезвешивании представлена на рисунке 5.16. Модель, собранная в Simulink представлена на рисунке 5.17. Более подробно она представлена в приложении А. Для максимально точного отображения системы обезвешивания система автоматического управления натяжением троса (САУ НТ) и следящая система каретки (ССК) представлены упрощенно, идеализированными подсистемами.

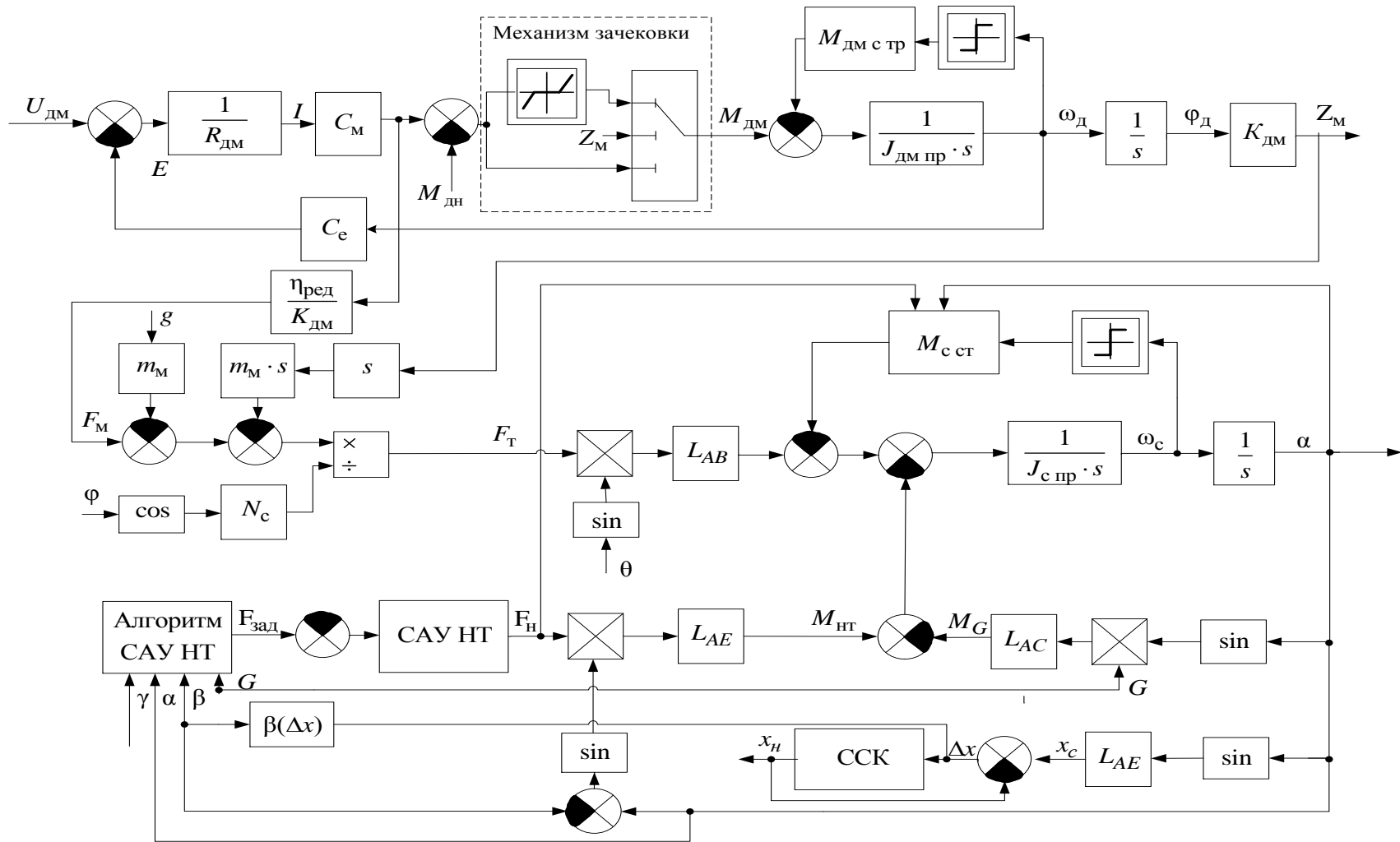


Рисунок 5.16 - Операторно-структурная схема системы раскрытия спицы рефлектора при ее обезвешивании

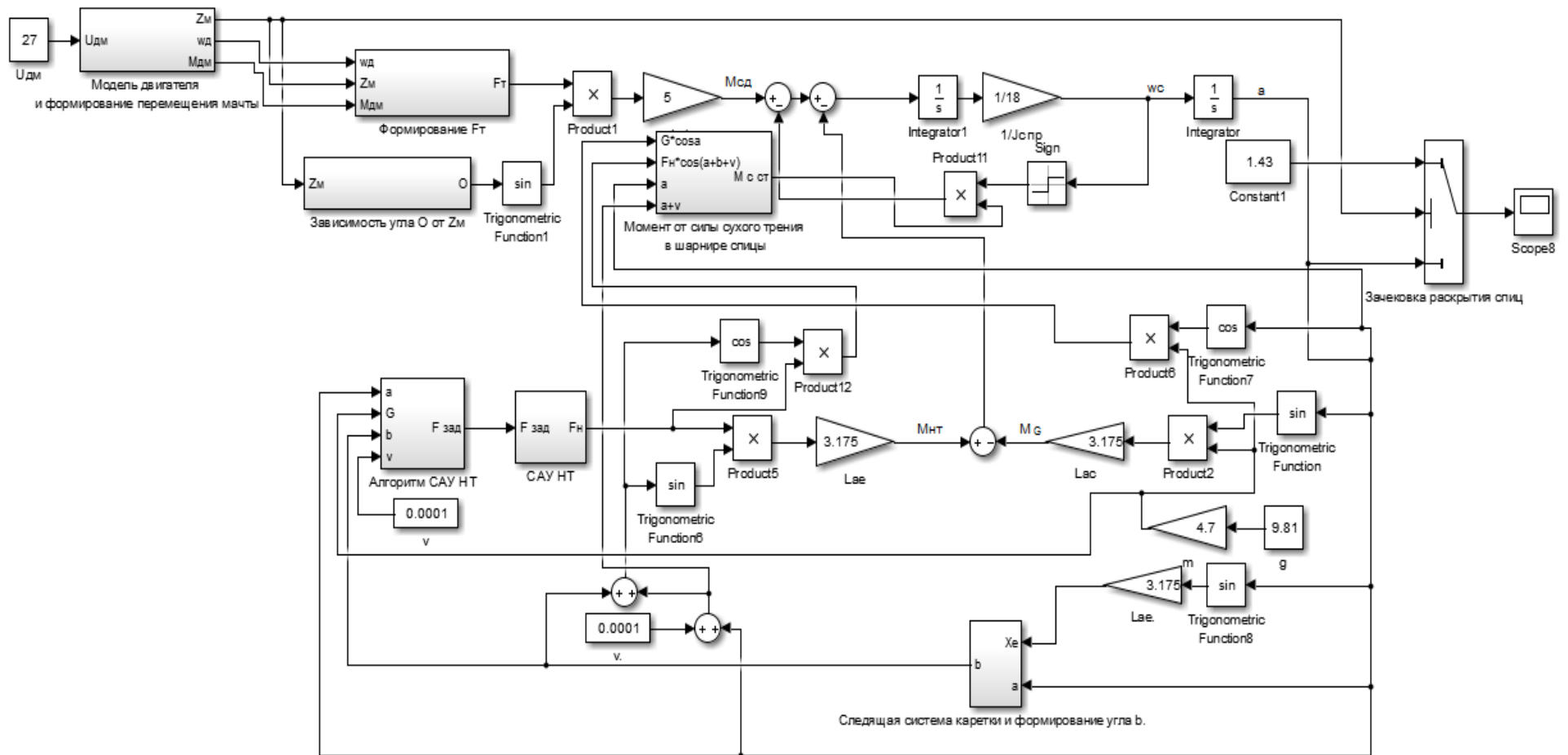


Рисунок 5.17 – Модель в Simulink системы раскрытия спицы рефлектора при ее обезвешивании



## 5.5 Графики, полученные в результате моделирования раскрытия спиц рефлектора антенны в условиях имитации невесомости

График перемещения мачты с течением времени полученных в ходе моделирования раскрытия спицы рефлектора антенны в условиях невесомости представлен на рисунке 5.18.

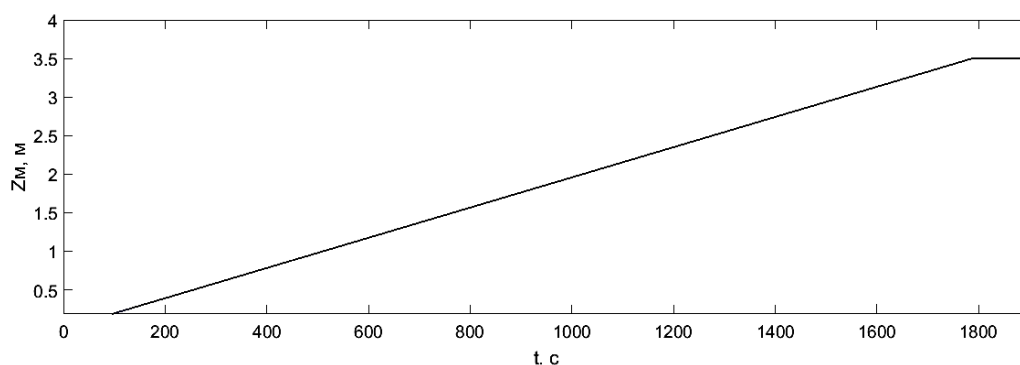


Рисунок 5.18 – График перемещения мачты  $Z_M$  с течением времени

График перемещения мачты показал, что мачта перемещается до 3,5 м за 1787 секунд, что на 3 секунды быстрее, чем при раскрытии спицы без обезвешивания.

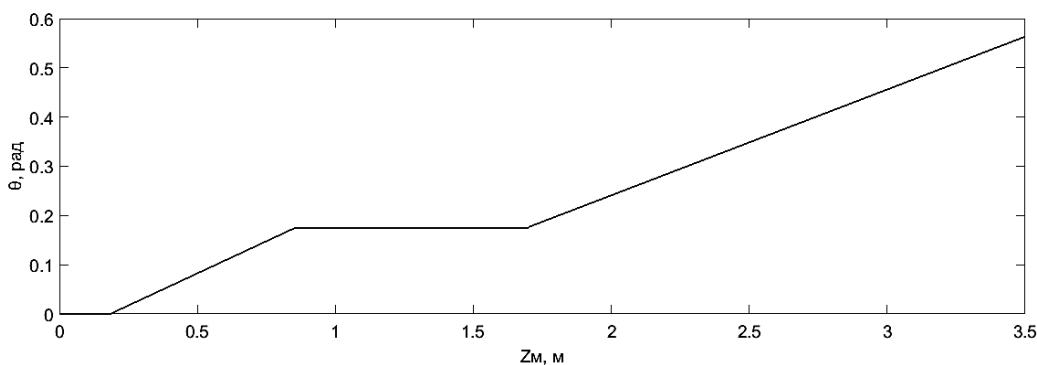


Рисунок 5.19 – Графики зависимости угла между оттяжкой и спицей  $\theta$  от перемещения мачты

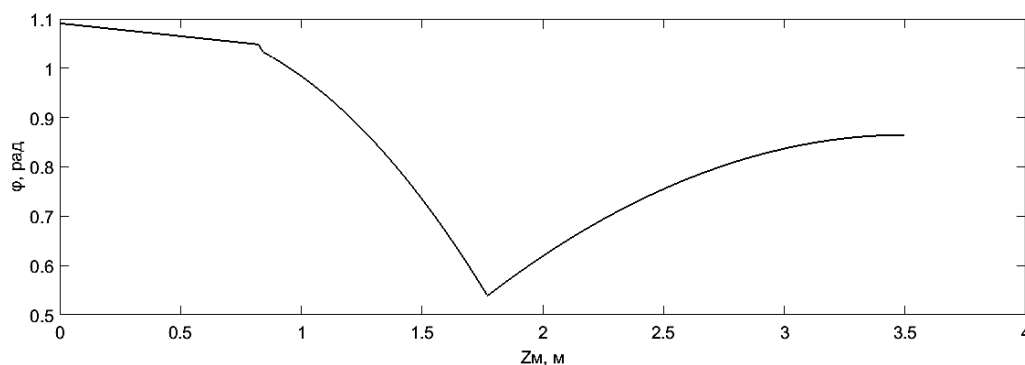


Рисунок 5.20 – График зависимости угла между оттяжкой и мачтой  $\varphi$  от перемещения мачты

Графики зависимости угла между оттяжкой и спицей и угла между оттяжкой и мачтой от перемещения мачты показали их схожесть с графиками при моделировании системы без обезвешивания спицы (рис 5.11, 5.12) следовательно общая кинематика механизма раскрытия спицы сохранилась.

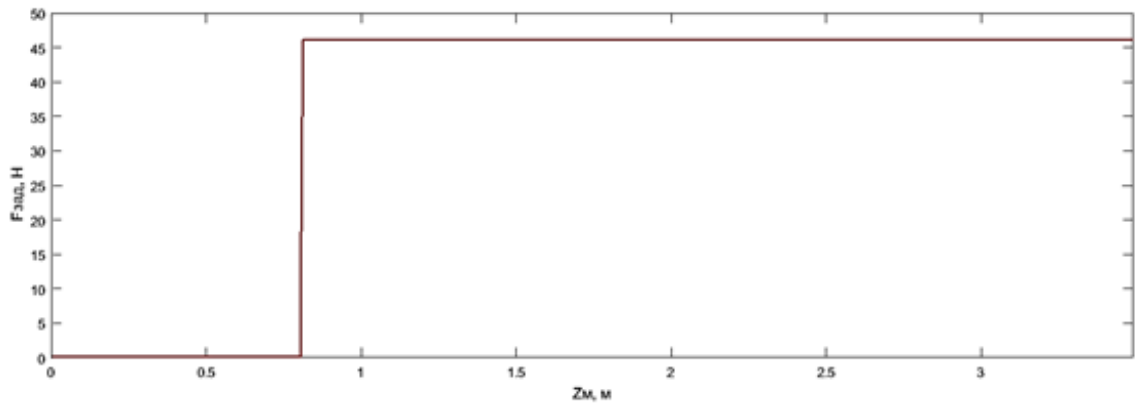


Рисунок 5.21 – График задающего воздействия на систему автоматического управления натяжением троса в системе активного обезвешивания спицы

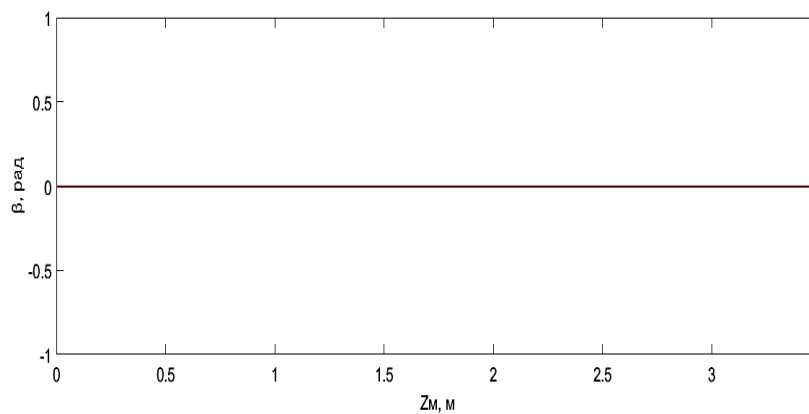


Рисунок 5.22 – График углового отклонения троса от вертикали  $\beta$

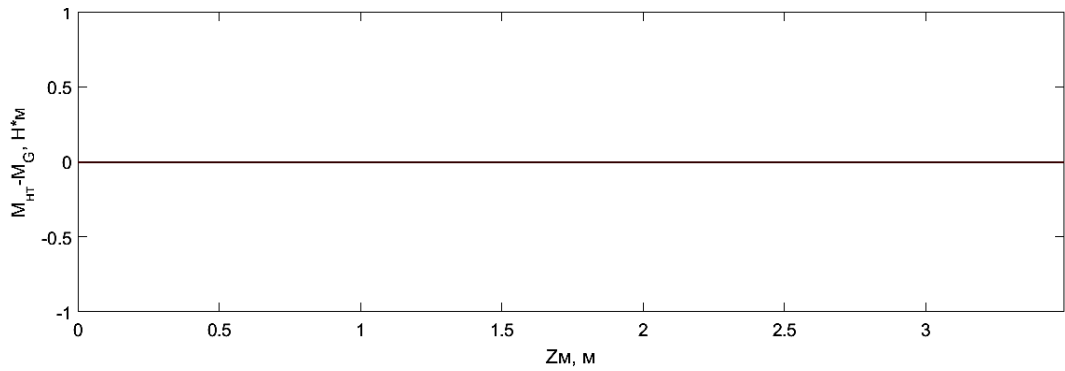


Рисунок 5.23 – График разности момента созданного тросом и момента от веса спицы

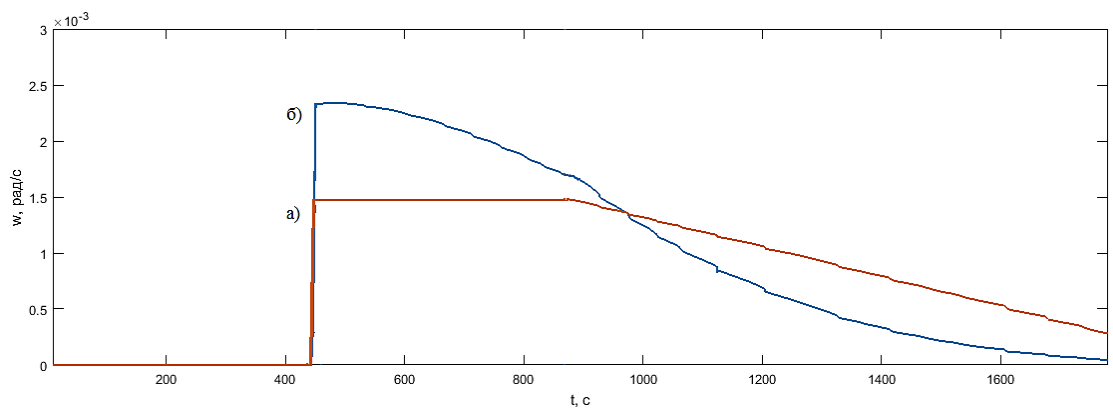


Рисунок 5.24 – Графики изменения скорости раскрытия спицы с течением времени: а) при раскрытии необезвешенной спицы, б) при раскрытии обезвешенной спицы

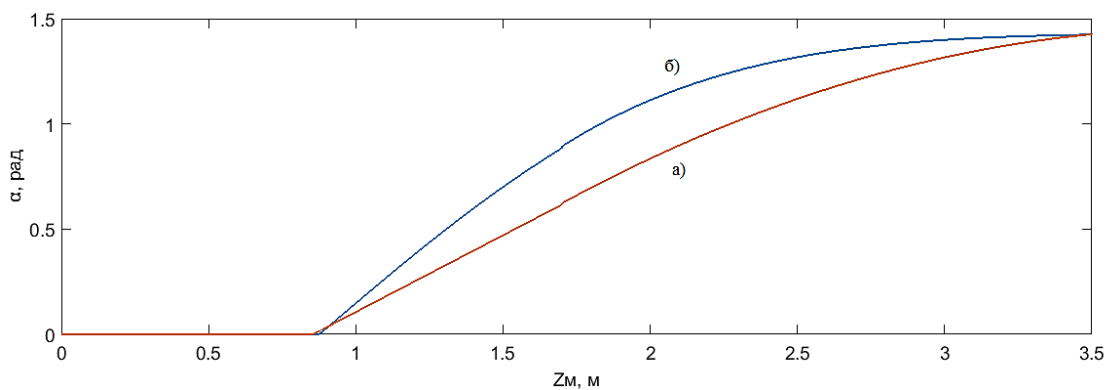


Рисунок 5.25 – Графики зависимости угла раскрытия спицы от перемещения мачты: а) при раскрытии необезвешенной спицы, б) при раскрытии обезвешенной спицы

Таким образом, из полученных графиков скорости и угла раскрытия спицы при моделировании раскрытия рефлектора в условиях имитации невесомости и сравнении их с графиками, полученными при раскрытии рефлектора без обезвешивания его спиц видно, что скорость раскрытия спицы при ее обезвешивании больше, чем при моделировании ее раскрытия в земных условиях. Это связано с тем, что при испытании раскрытия спицы в земных условия (без ее обезвешивания) за счет того, что спица имеет весовую составляющую, то есть обладает моментом сопротивления раскрытию спицы и дополнительными силами сухого трения от веса спицы, она имеет меньшую скорость раскрытия, если же спица обезвешена, то отсутствует вес и силы сухого трения от веса, что дает большую скорость раскрытия спицы и сила тяги идет на динамику спицы (рис. 5.21 б). Наличие обезвешивающего троса обуславливает создание дополнительной силы сухого трения от троса в сочленении спицы с основанием антенны. Эта сила (3.25) будет создавать дополнительный момент сухого трения в этом сочленении и тем самым искажать процесс раскрытия рефлектора на стенде по сравнению с тем, что будет происходить при раскрытии антенны в космосе.

## **5.6 Рекомендации по настройке математической модели процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн**

Так как аналитический расчет текущих значений момента от сухого трения в сочленении спицы с основанием антенны при моделировании процесса раскрытия спиц рефлектора антенны на стенде крайне сложен (а скорее всего, с необходимой точностью и не возможен). Поэтому требуется провести предварительные эксперименты для определения зависимости  $M_{c_{ст}}$  от вектора силы давления  $F_A$  со стороны спицы на ее шарнирное соединение с корпусом рефлектора антенны в различных ее положениях и

при разных величинах  $F_A$ . Определение характеристик сухого и вязкого трения осуществлялось экспериментально, согласно методике [19] при выполнении следующих экспериментов:

**Эксперимент № 1.** Определение сил сухого трения, приведенных к валу двигателя, от ротора электродвигателя, зубчатого редуктора и шнека МВМ:

- демонтировать оттяжку от мачты;
- задать требуемую скорость (поочередно от скорости близкой к нулю до максимальной) вращения ротора электродвигателя, посредством изменения напряжения питания;
- измерить ток в обмотках статора двигателя;
- получить зависимость электромагнитного момента двигателя от времени при заданной скорости;
- определить среднее значение момента при заданной скорости вращения.

**Эксперимент №2.** Определение силы сухого трения в шарнире спицы при разных уровнях разгрузки и разных положениях.

- демонтировать оттяжку от спицы;
- задать требуемую величину обезвешивания (0, 20, 40, 60, 80, 100% от веса спицы);
- динамометром подцепиться к спице и тянуть его до момента, пока спица не начнет отклоняться, продолжить процесс раскрытия спицы с фиксацией показаний динамометра до ее положения при полном раскрытии рефлектора;
- получить зависимость силы от угла раскрытия спицы при заданном уровне разгрузки;
- определить среднее значение силы при заданной уровне разгрузки;

**Эксперимент №3.** Определение сил суммарного трения с учетом оттяжек.

- установить оттяжки к мачте и спицам;

- задать требуемую скорость (поочередно от скорости близкой к нулю до максимальной) вращения ротора электродвигателя, посредством изменения напряжения питания;
- измерить ток в обмотках статора двигателя;
- получить зависимость электромагнитного момента двигателя от времени при заданной скорости;
- определить среднее значение момента при заданной скорости вращения.

## **Заключение**

В процессе выполнения диссертационной работы был проведен анализ существующих способов обезвешивания, в результате которого было установлено, что наиболее эффективным способом обезвешивания в условиях цеха АО «ИСС» является способ обезвешивания спиц рефлектора антенны, осуществляемый посредством механической силокомпенсирующей системы, состоящей из кареток и тросового подвеса с регулируемой силой его натяжения.

Были разработаны алгоритмы обезвешивания спицы рефлектора антенны космического аппарата при креплении троса подвеса как в центре масс спицы, так и не в центре масс и на подвижной каретке. Также предложен способ крепления троса к центру масс спицы с учетом ее конструкции.

По исходным данным от АО «ИСС» были определены кинематические зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при раскрытии рефлектора антенны космического аппарата. Также были определены зависимости силы тяги, прикладываемой через оттяжку к спице, и силы прикладываемой к мачте от спицы от перемещения мачты.

Была разработана математическая модель системы раскрытия спицы рефлектора антенны космического аппарата при раскрытии спицы в земных условиях и при ее обезвешивании. Результат моделирования показал, большую скорость раскрытия спиц, при испытании раскрытия рефлектора в условиях имитации невесомости, чем при ее раскрытии под действие собственного веса. Также сравнение графиков, полученных при моделировании системы раскрытия спицы рефлектора антенны в земных условиях показал их идентичность с зависимостями, выведенными аналитическим путем по исходным данным от АО «ИСС».

Для дальнейшей настройки модели раскрытия спицы рефлектора антенны при ее обезвешивании, предложены рекомендации по проведению экспериментов для определения момента сухого трения, приведенного к ротору двигателя и момента сухого трения от вектора силы давления со стороны спицы на ее шарнирное соединение с корпусом рефлектора антенны.



## Список публикаций студента

1. Зарницын А. Ю., Звонцова К.К. Исследование динамических свойств вертикального канала активной силокомпенсирующей системы // Инженерия для освоения космоса: сборник трудов IV Всероссийском молодежном форуме с международным участием, Томск, 2016 г.

2. Звонцова К. К. Исследование зависимости угла раскрытия спицы от перемещения мачты при моделировании процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн больших диаметров // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сбоник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2016 г.

3. Звонцова К. К. Исследование зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при моделировании процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн больших диаметров // Научная сессия ТУСУР-2016: сборник трудов XXI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 2016 г.

## Список использованных источников

1. И.Т. Беляков, И.А. Зернова, Е.Г. Антонов Технология сборки и испытаний космических аппаратов // Учебное издание. 1990. С. 142-144
2. Патент СССР № 1467418. МКИ G01M 13/02, F16H 21/16. Стенд для моделирования невесомости двухзвенных механизмов. Приоритет с 23.03.1989 г.
3. Патент СССР № 1722946. МКИ B64G 7/00, G01M 17/00. Исполнительный механизм имитатора пониженной гравитации. Приоритет с 30.03.1992 г.
4. Патент RU 2334970. МКИ G01M 19/00, B64G 7/00. Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией элементов. Приоритет 27.09.2008 г. Патентообладатель – Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение прикладной механики им. академика М.Ф. Решетнева"
5. Ковалев И.В., Кикоть Ю.О. Мобильная система имитации невесомости для крупногабаритных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 4(56). С. 173 – 178
6. Патент RU 2410299. МКИ B64G 7/00, G01M 99/00. Способ имитации пониженной гравитации. Приоритет с 23.03.1989 г. Патентообладатель – Кудрявцев И.А.
7. Патент CN 103887611.МКИ H01Q 15/16 Method for unloading of net surface of large netty antenna. Приоритет с 16.07.2014 г.
8. Патент US 20140041444. МКИ G01M1/00, B64G1/22 Apparatus for antenna weightlessness deployment test. Приоритет с 9.08.2012
9. Исходные данные на разработку антенн с рефлектором диаметром 8,6. – г. Железногорск: АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева», 2014. – 55 с.

10. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы «Разработка, изготовление и испытания системы обезвешивания автоматизи-рованной активной многоканальной». Шифр СЧ ОКР: «Кемчуг-КТИ». 774.ТЗ345-3210-14. – г. Железногорск: АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева», 2014. – 12 с.

11. Исходные данные на опытно-конструкторскую работу «Разработка, изготов-ление и испытания системы обезвешивания автоматизированной актив-ной многоканальной». Шифр ОКР: «Кемчуг-КТИ». 774.ИД 345-0051-14. – г. Железногорск: АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева», 2014. – 55 с.

12. Механизм выдвижения мачты РА. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 14F141.2732 ОТО\_R. – г. Железногорск: АО «Информа-ционные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева», 2014. – 13 с.

13. Статья: Curve Fitting Toolbox [Электронный ресурс]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/curvefitting/> Режим доступа: свободный (дата обращения: 18.02.2016)]

14. Видео урок: Curve Fitting Toolbox [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cxbyl1DiU2M> Режим доступа: свободный (дата обращения: 19.02.2016)]

15. Звонцова К. К. Исследование зависимости угла раскрытия спицы от перемещения мачты при моделировании процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн больших диаметров // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сбоник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2016 г.

16. Звонцова К. К. Исследование зависимости углов механизма раскрытия спиц от перемещения мачты при моделировании процессов стендовых испытаний механических устройств рефлекторов антенн больших

диаметров // Научная сессия ТУСУР-2016: сборник трудов XXI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 2016 г.

17. Малышенко А.М. Алгоритмические решения для стенда с системой активного обезвешивания и математическое моделирование процессов раскрытия рефлекторов антенн больших диаметров с целью наземных испытаний их механических устройств. // Отчет ТПУ по ОКР «Кемчуг-2», Томск, 2015.

18. Электропривод ДБ – 25. Паспорт КЭ4.225.002 ПС, 2014 г.

19. Кравченко, О.А. Управление электроприводами при учёте реальных свойств механических передач: учеб. пособие / О.А. Кравченко // Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 73 с.

## Приложение (А)

### Детализация модели системы раскрытия спицы рефлектора антенны в Simulink MatLab

Таблица А.1 – Обозначения, используемые в схеме

$U_{\text{дм}}$	Напряжение питания двигателя
$R_{\text{дм}}$	Активное сопротивление обмотки ротора
$I_{\text{дм}}$	Текущее значение тока в обмотке ротора двигателя
$M_z$	Зачековочный момент двигателя
$M_{\text{дм}}$	Движущий момент, развиваемый двигателем на своем валу
$M_{\text{дн}}$	Момент нагрузки
$M_{\text{дмс тр}}$	Момент сухого трения
$J_{\text{дм пр}}$	Приведенный к валу двигателя момент инерции его ротора и сочлененных с ним зубчатого редуктора и шнека МВМ
$\omega_{\text{дм}}$	Угловая скорость вращения вала двигателя
$\varphi_{\text{дм}}$	Угол поворота вала двигателя
$K_{\text{дм}}$	Коэффициент передачи между двигателем и мачтой
$Z_{\text{м}}$	Перемещение мачты
$F_{\text{тз}}$	Проекция силы тяги на ось z
$m_{\text{м}}$	Вес мачты
$m_{\text{с}}$	Масса спицы
$g$	Ускорение свободного падения
$V_{\text{м}}$	Скорость выдвигания мачты
$N_{\text{с}}$	Количество спиц
$L_{\text{ас}}$	Длина от шарниры спицы до ее центра масс
$L_{\text{аб}}$	Длина от шарниры спицы до точки крепления оттяжки
$L_{\text{ае}}$	Длина от шарниры спицы до точки крепления троса
$F_{\text{т}}$	Сила тяги спицы, приложенная через ленточную оттяжку
$\omega_{\text{с}}$	Угловая скорость вращения спицы
$\alpha$	Угол раскрытия спицы
$O$	Угол между оттяжкой и спицей $\theta$
$\nu$	Угол отклонения крепления троса от центра масс спицы $\gamma$
$b$	Угол отклонения троса от вертикального положения $\beta$
$M_{\text{с ст}}$	Момент от сухого трения в сочленении спицы с основанием антенны

Продолжение таблицы А

$M_{HT}$	приложенный к спице через трос ее вывески момент от системы автоматического управления натяжением троса;
$M_G$	Момент вращения спицы, обусловленный ее весом;
$M_{сд}$	Приложенный к спице через ленточную оттяжку момент вращения от механизма выдвижения мачты;
$x_e$	Расстояние между точкой крепления спицы А и точкой подвеса троса к спице по горизонтали
$x_n$	Расстояние по горизонтали между точкой крепления спицы А и точкой Н вертикального положения троса
$L_{АН}$	Расстояние между точкой крепления спицы А и ее вертикальной проекцией на направляющую движения каретки
$L_{ЕН}$	Расстояние точкой крепления троса к спице и ее вертикальной проекцией на направляющую движения каретки

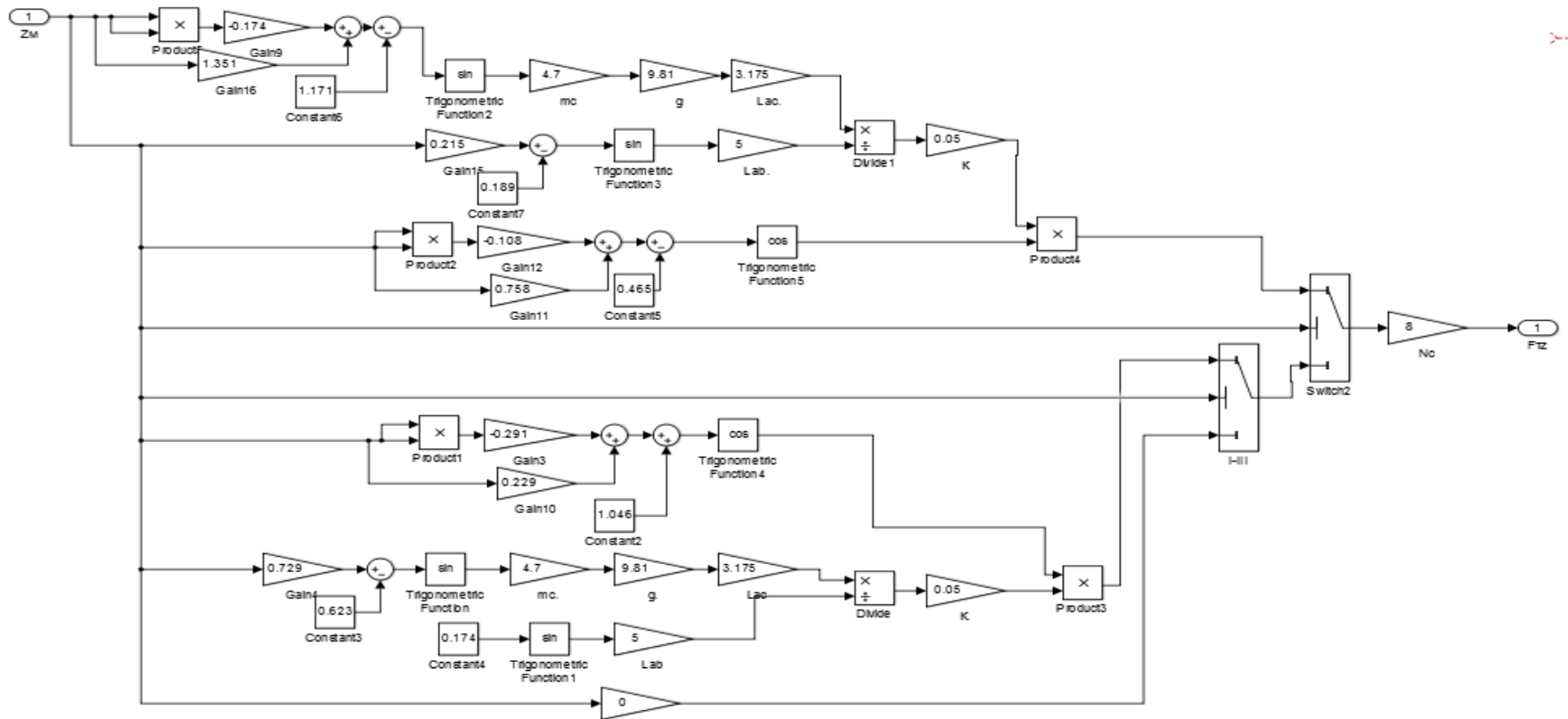


Рисунок А.1 – Блок «Зависимость  $F_{T_z}$  от  $Z_M$ »

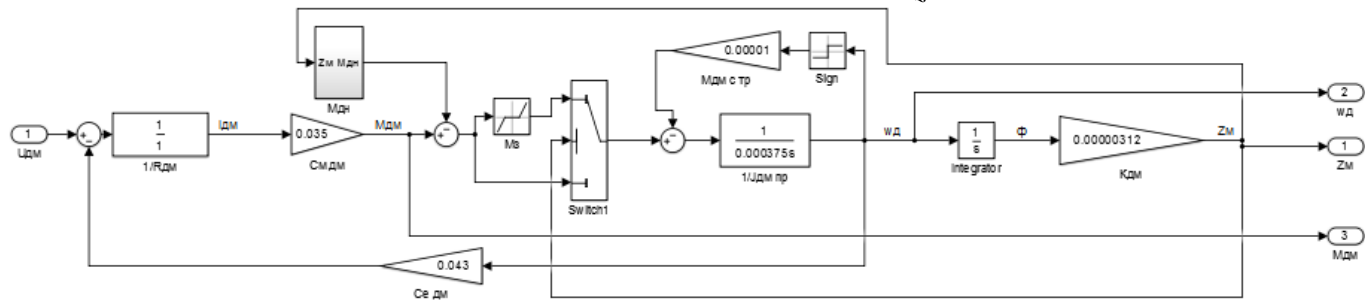


Рисунок А.2 – Блок «Модель двигателя и формирование перемещения мачты»

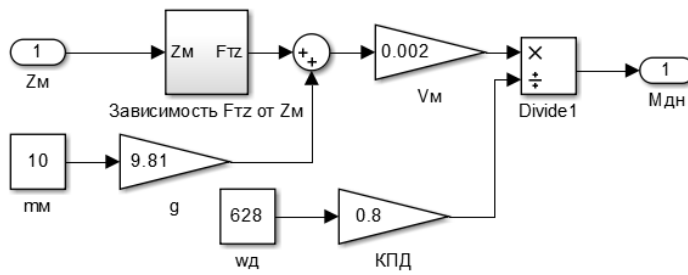


Рисунок А.3 – Блок « $M_{дн}$ »

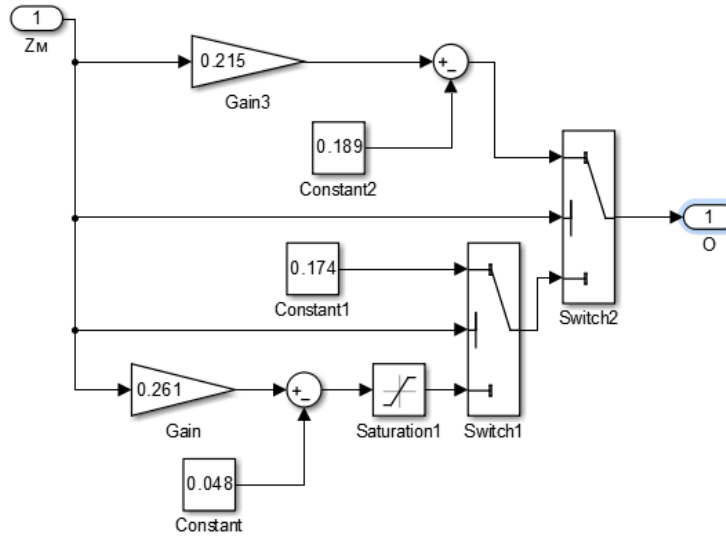


Рисунок А.4 – Блок «Зависимость O от  $Z_m$ »

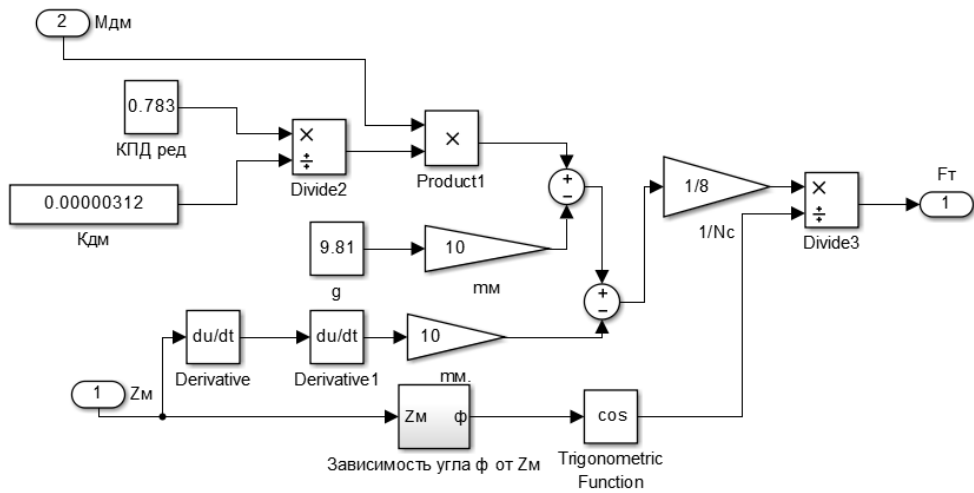


Рисунок А.5 – Блок «Формирование  $F_T$ »



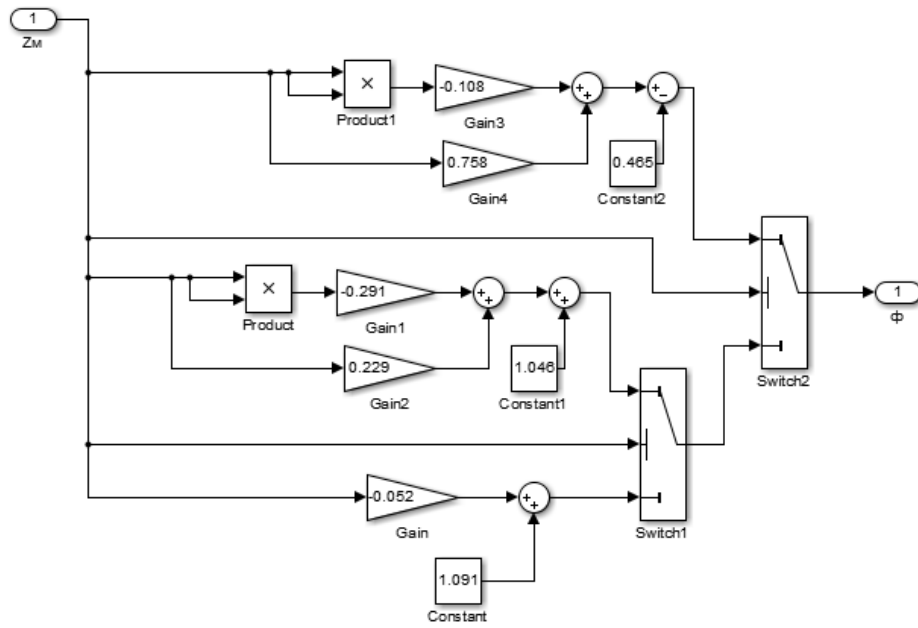


Рисунок А.6 – Блок «Зависимость угла  $\phi$  от  $Z_M$ »

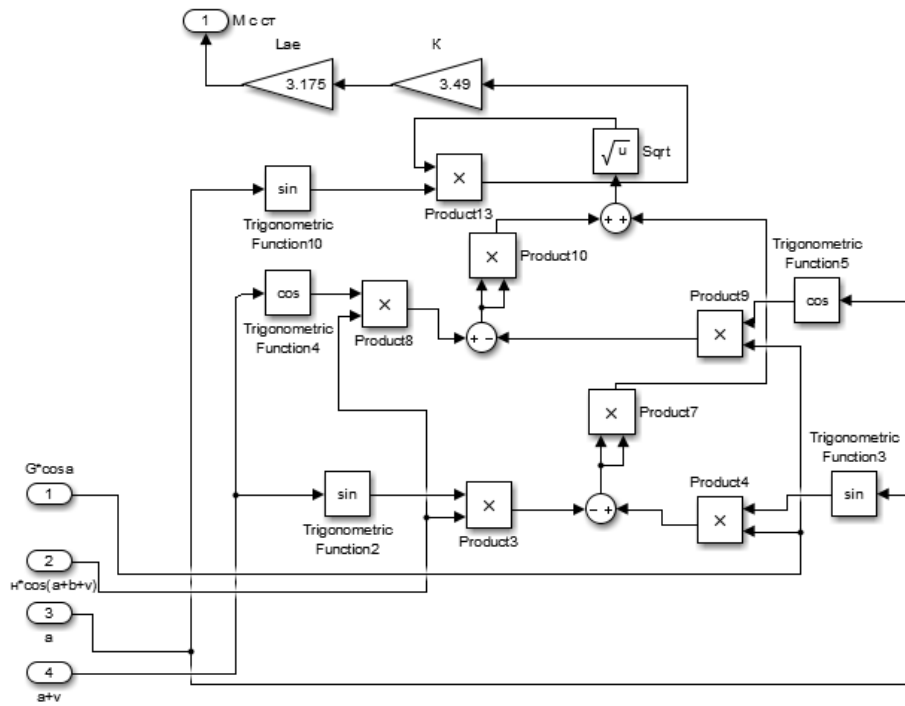


Рисунок А.7 - Блок «Момент от силы сухого трения в шарнире спицы»

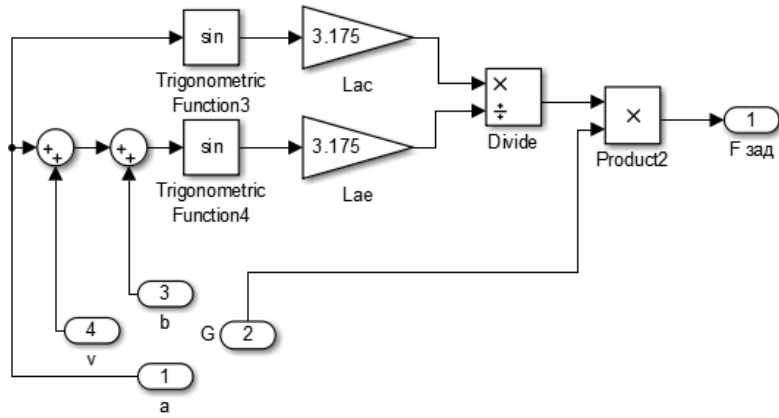


Рисунок А.8 - Блок «Алгоритм САУ НТ»

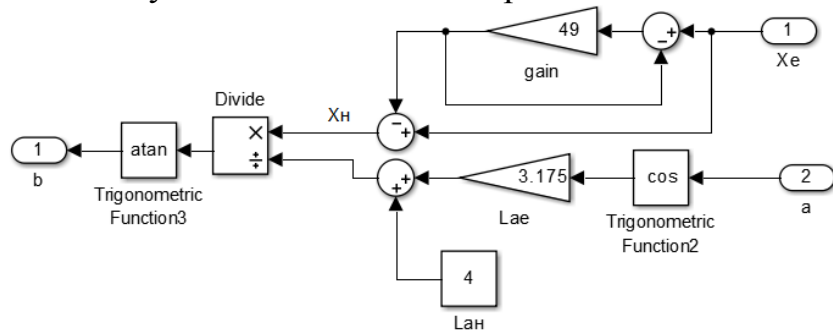


Рисунок А.9 - Блок «Следящая система каретки и формирование угла  $b$ »

## Приложение (Б)

### Раздел (3)

(Control algorithms for active systems of weightlessness imitation of single-rod spokes of the spacecraft's reflector – type parasitics at the ground testing their mechanical arrangements)

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Звонцова Кристина Константиновна		

Консультант кафедры \_\_\_\_\_ (ИКСУ) \_\_\_\_\_ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рудницкий Владислав Александрович	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры \_\_\_\_\_ (ИЯИК) \_\_\_\_\_ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преп.	Бутакова Татьяна Ивановна	зав. центром		

### **3. Control algorithms for active systems of weightlessness imitation of single-rod spokes of the spacecraft's reflector-type parasitics at the ground testing their mechanical arrangements**

#### **3.1. Statement for weightlessness imitation of the spacecraft's reflector-type parasitics for ground testing**

We will formulate the task that must be solved and developed by the system of active weightlessness imitation of probationary mechanical arrangements of reflector-type parasitics in the developing stand of DDW “Kemchug”.

The system of active weightlessness imitation is needed for the process of operational test of aerial's opening drive without secondary forces and moments created by gravity forces and its opening elements at all stages of their work: from the beginning to termination of disclosure to and allotment of working form to the aerial. Implementation of this requirement allows approaching the operational factors of aerial's mechanisms during the ground benchmark tests to those wherein they work in space. Its realization is equivalent to the problem of weightlessness of aerial elements, making spatial movements at its disclosing.

**The system of active weightlessness imitation of the disclosed aerials on the stand has to solve a problem of ensuring immutability of a control system by the opening drive of aerial to the weight of the disclosed elements.**

In the developing stand this problem is planned to be solved by weightlessness imitation of each spokes of reflector-type parasitics at the expense of their hummock vertical suspension on the slides moving over a reflector on horizontal guides in disclosure's planes of the spokes. These slides have to work in the mode of tracing and in the course of reflector's disclosure to provide vertical position of the spoke's wire suspension with the ultimate in accuracy.

Straining forces in wires of their suspension in stand that are necessary for spoke's weightlessness, have to provide automatic-control system by cable tension that for this purpose should not only encourage the required funicular force with

the help of electric actuators, but to spool the stripped parts of suspension's wire on the thimbles scattered on slides.

For the weightlessness imitation of each spoke of reflector it is required that in the process of its work the sum of rotation's moments in reference to center of inertia would be supported as zero-based in the process of reflector's disclosure.

This statement would be fair when the problem of a weightlessness imitation of spokes (or some other products of an unchangeable form) that are moving freely in three-dimensional space and fixed on a vertical cable in their center of inertia would be solved.

At disclosure of reflector-type parasitics at the stand developing in **DDW “Kemchug”** each one-unit spoke should be considered as the beam swivel fixed by the one end on the fixed base and suspended on a wire (it isn't obligatory with its fixing in the center of inertia of this beam). The settlement scheme of the spoke's disclosure in this interpretation is represented in Figure 3.1.

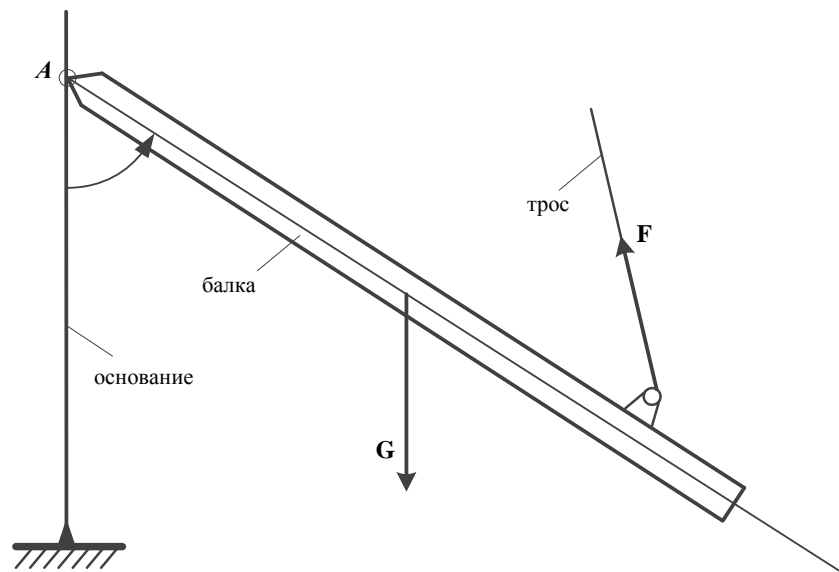


Figure 3.1. The scheme of a hummock weightlessness imitation of the beam swivel fixed by the one end on the base.

In this regard the problem of ensuring the immutability of drive operation of the spoke's disclosure from its weight is reduced to creation by the system of active weightlessness imitation of a such stand's funicular force that in conjunction with a

spoke's weight at any provisions of the spoke during its disclosure would provide the performance of the following conditions:

$$M_A(\mathbf{G}) + M_A(\mathbf{F}) = 0; \quad (3.1)$$

$$\mathbf{F}_A(\mathbf{G}) + \mathbf{F}_A(\mathbf{F}) = 0. \quad (3.2)$$

In equalities (3.1) and (3.2) the following designations are used:

$\mathbf{G}$  – vector of a weight force of a weightlessness spoke;

$\mathbf{F}$  – vector of weightlessness funicular force;

$M_A(\mathbf{G})$  – the moment created by a spoke weight force vector concerning axis A of its turn at disclosure;

$M_A(\mathbf{F})$  – the moment created by a vector of weightlessness funicular force concerning axis A of its turn at disclosure;

$\mathbf{F}_A(\mathbf{G})$  – the pressure force vector on a hinged joint of a spoke with the basis created by a vector of a spoke's weight force;

$\mathbf{F}_A(\mathbf{F})$  – the pressure force vector on a hinged joint of a spoke with the basis created by a vector of weightlessness funicular force.

**Equalities (3.1) and (3.2) are also conditions of absolute immutability of the spoke's disclosure drive operation** of the aerial from its weight that the system of an active weightlessness imitation of the stand has to provide due to generation on the entire period of aerial reflector's disclosure of such aerial's funicular force at which these equalities are carried out. A priori it is necessary to recognize that it won't be possible to achieve at benchmark tests of mechanical devices of aerials the absolute immutability to impacts of the weight of disclosed aerial elements on them at putting the systems of an active weightlessness imitation in the developing stand for a variety of causes. We will list the main of them.

1. When mechanical devices of reflectors of aerials are tested at the stand at full assembly of the aerial (with a knotted fabric radio mirror fixed on the reflector), it will be difficult to define the location of the center of inertia of the spoke and the

part of a knotted fabric radio mirror supported by it. Besides, it will change its location depending on the aperture angle of the spoke.

2. Finite rigidity of elements of aerial's spokes connection with which at their disclosure not only their angular situation, but also deflections connected with their flexibility and shifts of the centers of inertia of spokes or their links changes is disregarded.

3. Influence of the aerodynamic forces affecting the aerial and its reflector in shop conditions at their disclosure is disregarded.

### **3.2. Algorithm of spoke's weightlessness imitation when mooring suspension in the center of inertia and on movable carriage**

The task of weightlessness imitation in case of CAT of disclosure of reflector's spokes when these spokes are one-rod, can be reduced to the solution of a task of weightlessness imitation of the beam gimbal-mounted by one of its ends on the rigid foundation imitating the spacecraft's case. The simplified scheme of such a beam with weightlessness imitation by means of the system of an active weightlessness imitation using a rope suspension and the carriage is provided in Figure 3.2.

In this Figure the following designations are used: **B** is a beam length AB, **T<sub>p</sub>** is wire beam suspension, **K** is the carriage for its suspension moving according to the horizontal directing **H**. It is expected that such a beam is hinged to the foundation in point A. Its center of inertia is located at the point. The beam is persevered on a wire at the point (in its center of inertia), and the upper end of the wire is fixed on the bobbin placed on carriage **K** which is equipped with a funicular force of the closed loop circuit and servo-mechanism providing at testing the swing drive of the turn of the beam placed at point A, such a movement of the carriage on a horizontal guide is so that the cable of suspension remained whenever possible more precisely in vertical position.

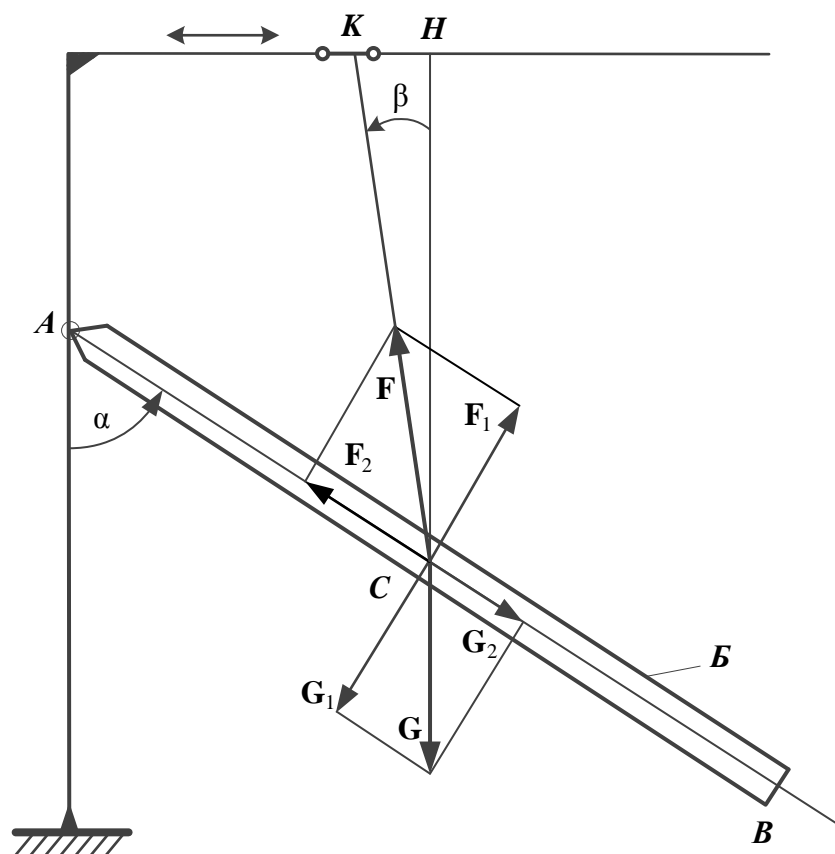


Figure 3.2. The scheme of weightlessness imitation of the beam gimbal-mounted by one of the ends on the rigid foundation.

The task of active system of weightlessness imitation is reduced to minimization of the influence of all devices intended for beam's weightlessness imitation on its movements in the course of operation of the drive of its disclosure. Let's consider that in an initial condition the beam before operation of its drive of disclosure is in vertical position. Its respective angular provision in the course of disclosure is determined by a corner  $\alpha$ , and the current angular error of a cable from a vertical is the corner  $\beta$ .

The task of the system of weightlessness imitation of an active (SWI) is to neutralize the influence of weight of the beam on the process of its turn ("disclosure") as it would take place in case of its disclosure in space. It means that ideally it is required to provide in the course of disclosure of the beam joint forces and angular



forces transferred to it from a rope suspension and gravity of the beam, equal to zero. These requirements also predetermine the algorithm of SWI work.

We will determine forces and the moments stated above using the designations accepted in designation (see subsection 1.2, Russian variant) and believing in further mathematical calculations that the center of inertia of the beam is from the center of its suspension at the distance  $L_{AC} \triangleq AC$ . In that case beam weight force  $\mathbf{G}$  its angle of rotation, equal to  $\alpha$ , it is possible to spread out on two mutually constituting  $\mathbf{G}_1$  и  $\mathbf{G}_2$ , first of which is orthogonally to the beam axes, and the second is directed on this axis. At the same time

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha; \quad (3.3)$$

$$\mathbf{G}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha. \quad (3.4)$$

In a similar way we will decompose on mutually orthogonal components and funicular  $\mathbf{F}$  force. As a result the projection of this force to an axis of the beam will be determined as

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta), \quad (3.5)$$

and projection, orthogonal to it

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta). \quad (3.6)$$

In that case caused by action of weight of beam  $\mathbf{G}$  and funicular force  $\mathbf{F}$  the rotational moment about an axis of the link  $A$  can be determined as

$$\mathbf{M}_A = L_{AC} \cdot (\mathbf{F}_1 - \mathbf{G}_1) = L_{AC} \cdot (\mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mathbf{G} \cdot \sin \alpha), \quad (3.7)$$

and acting under influence of  $\mathbf{G}$  and  $\mathbf{F}$  along the beam axis on its foundation in point  $A$  force

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{G}_2 - \mathbf{F}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha - \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta). \quad (3.8)$$

Imitation of the beam in weightlessness will be ideal in situations when

$$\mathbf{M}_A \equiv 0 \text{ и } \mathbf{F}_A \equiv 0. \quad (3.9)$$

It is necessary for accomplishment of these conditions that in the course of the beam turn under the influence of its drive the next condition will be satisfied

$$\mathbf{M}_A = L_{AC} \cdot (\mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mathbf{G} \cdot \sin \alpha) \equiv 0, \quad (3.10)$$

It is equivalent to the requirement that cable tension force size

$$F = G \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}. \quad (3.11)$$

Hereinafter:

$$F \triangleq |\mathbf{F}|; \quad G \triangleq |\mathbf{G}|. \quad (3.12)$$

In this case according to (3.8) and (3.11) the second condition from (3.9) will be satisfied.

Therefore, in the course of the beam turn for the purpose of an exception of influence of its weight for operation of the driving engine force of tension of the cable shall meet condition (3.9) and, so the setting impact  $F_{\text{ycr}}$  on the system of automatic control of a cable tension in system of an active weightlessness imitation of a beam should be created as

$$F_{\text{зад}} = G \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}. \quad (3.13)$$

It will be equal to beam weight force only in that case when the follow-up system of the carriage in the course of a turn of the beam provides strictly vertical position of the cable of suspension, i.e. to satisfy condition  $\beta = 0$ .

Algorithm (3.13) solutions of task of weightlessness of imitation gimbal-mounted product, apparently, are the simplest. However, its implementation in case of bench testing does not guarantee absolute immutability of operation of mechanical devices of a reflector against the weight of spokes as in practice it is difficult (and can even impracticably) provide combination of a point of the sign of the cable of suspension of the spoke precisely in the center of its inertia in connection with design features of the spoke and implemented in the developed suspension stand. Moreover, the task of the specified immutability is complicated by 2 factors which have already been defined above.

### 3.3. Algorithm of spoke's weightlessness imitation at suspension's mooring not in its center of its inertia and on movable carriage

The scheme of such suspension is provided in Figure 3.3.

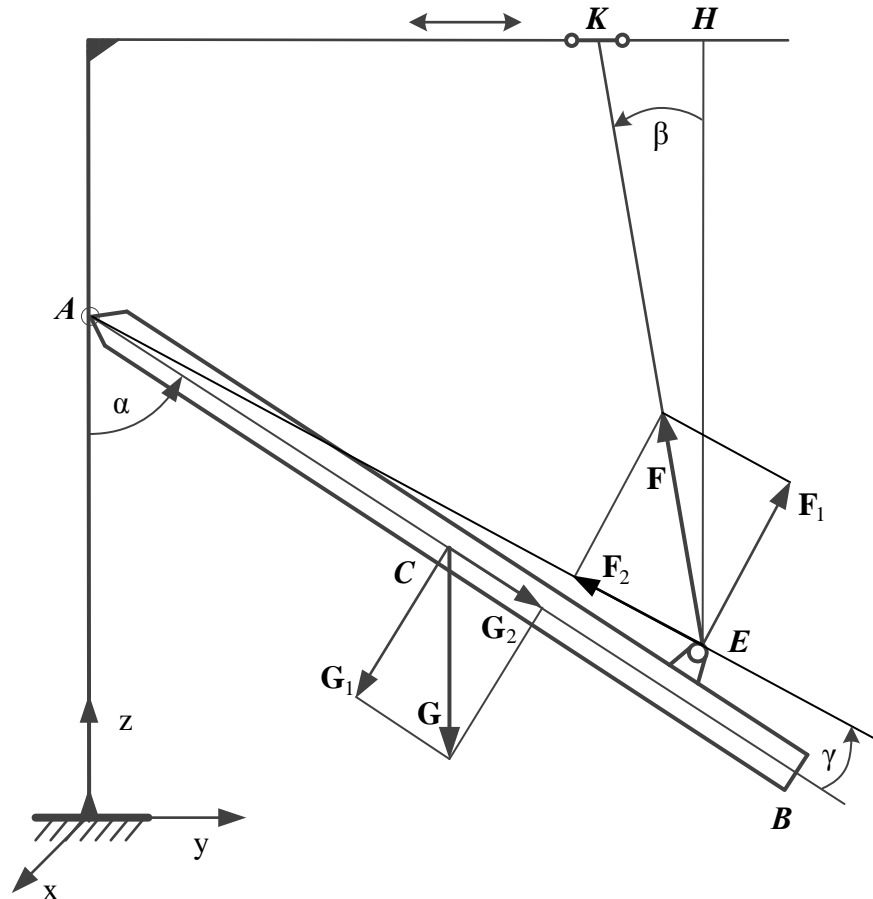


Figure 3.3. The scheme of the beam's weightlessness imitation in case of discrepancy of its center of inertia and points of the sign.

In this case the point of fixing of the cable of suspension  $E$  on beam does not match with the center of inertia  $C$ . Further we believe, as well as in 3.2, that  $L_{AC} \triangleq AC$  sign point radius vector  $E$  concerning the center of  $A$  swing joint of the beam with a rack is equal  $L_{AE} \triangleq AE$ .

In case of such option of suspension of projection of force of weight of the beam to its axis  $AA_1$  and in the direction, perpendicular to it, will be determined by the same formulas (3.3) and (3.4), as in the suspension option considered above, i.e.

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha; \quad \mathbf{G}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha. \quad (3.14)$$

Force projection  $\mathbf{F}$  to the direction  $AE$  will be determined by the formula

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F} \cdot \cos (\alpha + \gamma - \beta), \quad (3.15)$$

where  $\gamma$  is a corner between an axis of beam  $AA_1$  radius vector  $AE$  of a point of fixing of cable of suspension.

Other component of force of tension of cable  $\mathbf{F}$  in case of its decomposition on two orthogonal directions is determined as

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F} \cdot \sin (\alpha + \gamma - \beta), \quad (3.16)$$

At the same time the moment of rotation of the beam concerning its axis of rotation in a hinged joint created by set of force of weight of beam and force of tension of the cable of its suspension

$$\mathbf{M}_A = \mathbf{F}_1 \cdot L_{AE} - \mathbf{G}_1 \cdot L_{AC} = \mathbf{F} \cdot L_{AE} \cdot \sin (\alpha + \gamma - \beta) - \mathbf{G} \cdot L_{AC} \cdot \sin \alpha. \quad (3.17)$$

This moment in the course of the turn of the beam will be equal to zero provided that force of tension of the cable will be supported at the same time equal to

$$F = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \gamma - \beta)}. \quad (3.18)$$

Therefore, the setting impact on the system of automatic control of force of tension of the cable of the sign shall be equal

$$F_{\text{зад}} = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \gamma - \beta)}. \quad (3.19)$$

If at the same time force of cable tension is precisely determined according to (3.19), then for its component  $\mathbf{F}_2$  along axis  $AE$  there will be fairly following calculated value:

$$\begin{aligned}
F_2 &= G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma - \beta)} \cdot \cos(\alpha + \gamma - \beta) = \\
&= G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{Ctg}(\alpha + \gamma - \beta).
\end{aligned}
\tag{3.20}$$

If in case of ground tests the weightlessness product manages to be suspended so that the condition and a mistake in work of the watching system of the carriage will be satisfied will be insignificant in terms of cable deviation corner  $\beta$  from a vertical, then the component of force  $\mathbf{F}_2$  of cable tension can be approximately determined by the formula:

$$\mathbf{F}_2 \cong \mathbf{G} \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}} \cdot \cos \alpha.
\tag{3.21}$$

Therefore, its size depends on the current angular provision of the beam. In case of accomplishment of the conditions stated above ( $\gamma = 0$ ,  $\beta \approx 0$ ) specifying impact of type (3.19) can be replaced with a simpler one, namely:

$$F_{\text{зад}} = G \cdot \frac{L_{AC}}{L_{AE}},
\tag{3.22}$$

i.e. it is accepted in the same type, as for the situation when the product is suspended in its center of masses.

Distinctive feature of the beam's weightlessness imitation option considered in this subsection in comparison with the previous option is that even during the ideal work of automatic system of an active weightlessness imitation (its follow-up system of the carriage and system of a tension of a cable of a suspension), total pressure force on the bearing of a hinged suspension will not be equal to zero. Its value is determined by vector amount  $\mathbf{G}_2 + \mathbf{F}_2$ .

Projection of the amount of forces  $\mathbf{G}_2 + \mathbf{F}_2$  to the axes  $Y$  and  $Z$  an orthogonal trihedron of axes, basic for the stand of a weightlessness imitation  $XYZ$ , brought to point  $A$  (the hinge pin) and denoted as follows  $\mathbf{F}_{Ay}$  и  $\mathbf{F}_{Az}$ , according to Fig. 3.3, are equal:

$$\mathbf{F}_{Ay} = -\mathbf{F}_2 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + \mathbf{G}_2 \cdot \sin \alpha;
\tag{3.23}$$

$$\mathbf{F}_{Az} = \mathbf{F}_2 \cdot \cos(\alpha + \gamma) - \mathbf{G}_2 \cdot \cos \alpha. \quad (3.24)$$

Final vector of force with which the spoke will press on support in its joint the case of the mechanism of promotion of a mast of a reflector

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_{Ay} + \mathbf{F}_{Az}, \quad (3.25)$$

and its module can be calculated by the formula:

$$|\mathbf{F}_A| = \sqrt{\mathbf{F}_{Ay}^2 + \mathbf{F}_{Az}^2}. \quad (3.26)$$

This force will create the additional moment of Coulomb friction in the spoke joint with the case and by that to distort process of disclosure of the reflector at the stand in comparison with what will occur in case of disclosure of the antenna in space. We will notice that the direction of application of force  $\mathbf{F}_A$  in the joint in this case has no essential value.

Exact implementation of algorithm (3.19) managements of weightlessness imitation of gimbal-mounted beam is rather difficult decision in implementation as demands information on the current values of angle  $\alpha$  of rotation of a beam and a corner  $\beta$  of a deviation of a cable of a suspension from a vertical. It can be simplified significantly if in the follow-up system of the drive of the carriage to establish a preset value of a corner  $\beta$  not equal to zero, and to accept to constants

$$\beta_{зад} = \gamma. \quad (3.27)$$

In that case in case of its rather exact working off by the follow-up system of the carriage algorithm (3.19) can be replaced on simpler, corresponding (3.22). At the same time in the course of a beam turn the setting in the channel of automatic control of force of a tension of a cable will be a constant and will not be required for its task to use the current values  $\alpha$  и  $\beta$ .

But even in case of fine tuning (3.27) and implementation of algorithm (3.22) in system of weightlessness imitation need the aim to combine a point of fixing of the cable of sign on the spoke with the center of its masses at least because the more there will be a difference between their provisions, the more will be force  $\mathbf{F}_A$  in

spoke joint with the case of antenna and, respectively, violation of condition (3.2) absolute immutability of process of disclosure of the spoke from its weight.

### **3.4. Choice of variant of spokes sign of reflector-type parasitics for the developing stand**

The both options of suspension of weightlessness imitation mentioned above are integrated to difficulties in their practical implementation.

The most attractive variant of weightlessness imitation as it was mentioned above is the first considered variant in case of which the cable of sign of the spoke fastens in its center of inertia. Structures of antennas of big diameters and spokes of their reflectors complicate mooring of suspension in the centers of inertia of spokes.

In antennas of big diameters developed for disclosure of reflector's spokes they use the mechanism of tower advancing (MTA) which is built in the antenna reducible by the electric motor. At the same time for disclosure of reflector-type parasitics with the attached network fabric to it all spokes of a reflector are attached to the tower by the ribbon type anchor wires with the width about 40 mm of (Fig. 3.4).

If to carry out the disclosure of a reflector at the stand developed within DDW "Kemchug" so that in its working position the network fabric appears above it, than the wires of a spoke's sign will have to pass through the network fabric antennas and at disclosure of its reflector "to cut it through" that is, naturally, isn't admissible. For this reason the reflector-type parasitics disclosure equipped with mechanisms of promotion of towers can be carried out with promotion of their towers only upwards.

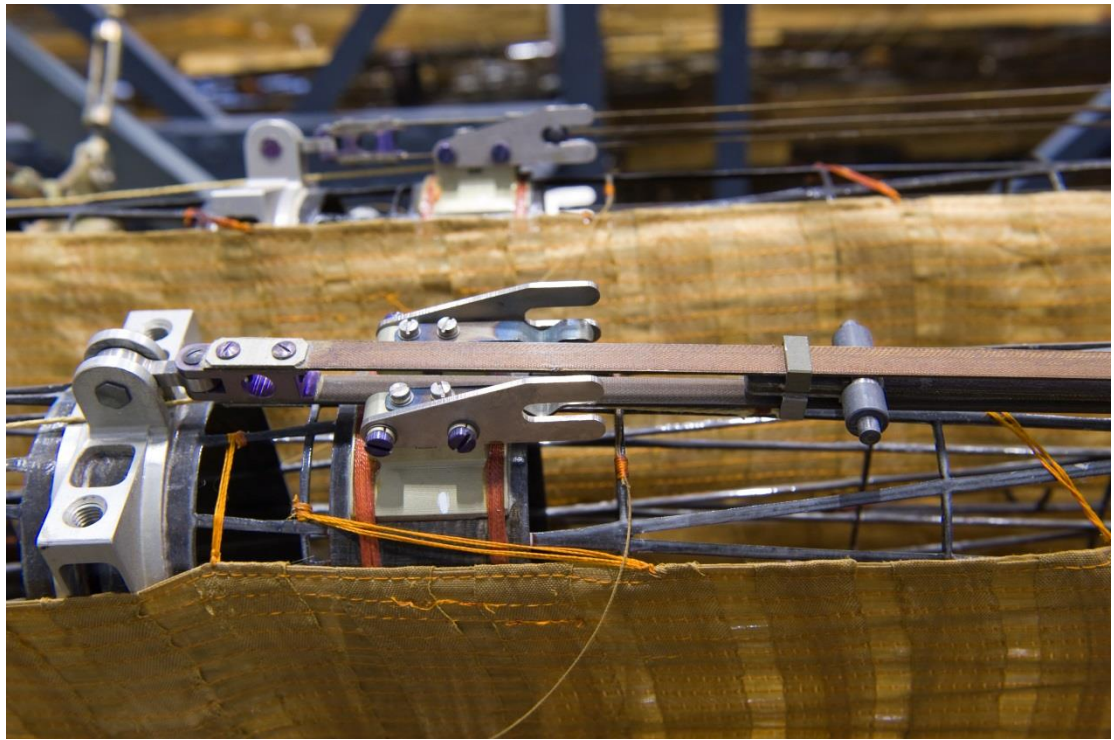


Figure 3.4. Arrangement of a spoke and draft of its disclosure in a horizontal shipping position.

If to carry out the disclosure of reflector at the stand so that in its working position the network fabric appears below it, (i.e. with promotion of a tower upward), then in the course of disclosure of a delay (draft), the connecting spokes with a tower, will directly settle down over the spokes (Fig. 3.4) given by them, move in the vertical planes of disclosure of spokes and to block an access to a spoke for a wire for the system of an active weightlessness imitation on all length of a spoke from the link of its binding on the base side of the antenna to the point of fixing of an anchor wire on it.

Taking into account that width of drafts of disclosure of spokes is about 40 mm, in the course of disclosure of spokes in the vertical plane over a construction axis of each spoke will be such width a zone of working provisions of draft of her disclosure and this zone will close from above the center of inertia of a spoke during the whole time of disclosure of a reflector. In this regard the rope vertical suspension of a spoke in single-core option of his execution with his fastening on a spoke in a



zone of its center of inertia and on the carriage which is vertically located over it isn't possible.

The second circuitry variant of weightlessness imitation is when the cable of sign fastens on a spoke in its trailer part (after the point of fixing of a disclosure drive delay on it) will have the advantages listed in subsection only when on spokes struts for increase in the moments attached to spokes through delays at the initial moments of their disclosure aren't established.

If spokes have struts, then at the initial stages of disclosure of spokes the strut with the tape delay placed on him will interfere with a vertical arrangement of a single-core cable of a weightlessness imitation (there will be their overlap, the anchor wire will also be in a working position of this cable at the first stage of disclosure of a reflector).

For this reason and in this case it is necessary to choose any other circuitry solution of a suspension of a spoke or driving elements of its disclosure (a rubble anchor wire and a brace strut).

Taking the above into account, the following option for weight mooring on spokes is offered.

### **3.5. The type of weight's mooring on the spoke in its center of inertia with the use of its reduplicate performance**

This type of weight can be considered as the most preferable among the all possible options of weight's mooring as only in the case of cabling exactly in the center of inertia the necessary conditions of absolute invariance of revelation the spokes from their weight (its influence) are potentially provided.

For such solution it is possible to accept and realize the following technical solutions at ground benchmark tests of mechanical devices of reflector-type parasitics.

1. In the place of the center of inertia of spoke bandage device (loop) for fixing of rope suspension is rigidly installed on it. In particular, for the transmitting

antennas with a diameter of 8,6 meters such devices have to settle down on spokes with serial numbers from 2 to 8 at in distance of  $3175 \pm 100$  mm from axes of their turn on the basis of the reflector and at distance of  $3290 \pm 100$  mm – on a force a spoke № 1 with a diameter of 230 mm to which the block mechanical devices of the reflector's turn fasten.

2. The rope suspension in the lower part between spoke and a mobile roller of a sheave block should be executed in a two-cable execution as it is shown in fig. 3.5. The length of a bi-cable suspension  $L_{2T}$  has to exceed the spoke length  $L_{AC}$  (see Fig. 3.3) from its center of inertia to the pivot point  $A$  at size  $\Delta L_{2T}$ , that is it has to be chosen from the condition:

$$L_{2T} > L_{AC} + \Delta L_{2T}. \quad (3.28)$$

The range that is included in ratio (3.28)  $\Delta L_{2T}$  has to provide the free pass of a kneepiece and guy wire of a spoke between two wires of its suspension in the course of disclosure of spoke from starting transport position to its working position. It isn't difficult to calculate this size at the set design requirements of the reflector.

3. For retention of two wires of spoke's weight that are parallel in the course of its disclosure it is necessary to establish a rigid clamp of wires (Fig. 3.5) after that the suspension is carried out in the single cable execution up to the bobbin of the carriage of system of an active weightlessness imitation of this spoke and in that its stock which is reeled up on the bobbin. At the same time the sensor of weight it is desirable to arrange behind the clamp of cables at once.

4. If in the created stand the polyspast suspension put in design documentation will be realized, a mobile roller of a polyspast it is necessary to dispose right behind the weight sensor. It will allow to lower requirements to height of shop in which it is supposed to place this stand.

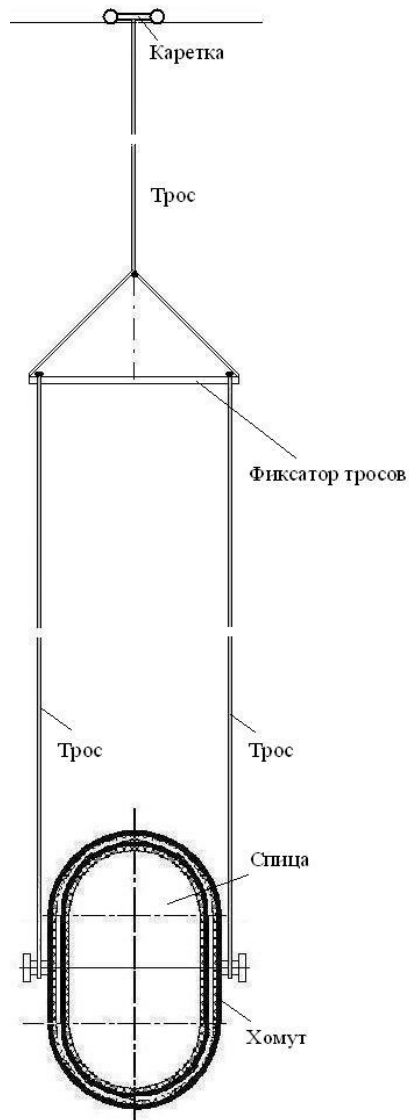


Figure 3.5. Variant of the combined rope suspension of spoke.

With a height of shop of 11 meters the configuration of suspension of the spokes stated above will be guaranteed accepted for disclosure of reflectors with a diameter of 8,6 meters, but it can be insufficient for tests of reflectors with a diameter of 12 meters and more. In this regard it is necessary to decide about the choice of another variant of sign of spokes (not in the centers of inertia of their links). The simplest decision in this case it is the transferal of sign's points, at least, from the root parts of the spokes to their end , but also in this case **the single cable variant of a sign will be unacceptable because of its strutted overkill and anchor wire at the first stage** of the spoke's disclosure.

Moreover, the carrying over of spoke's part sign point from the center of its inertia in any other point will lead to the fact that **conditions (3.1) and (3.2) of the absolute immutability of spoke's** disclosure process weight will turn out to be even potentially failed to deliver. Therefore, the weightlessness imitation will be fatally and essentially affected on the developing stand at expansion of weightlessness imitation on it, and therefore the effectiveness of the land optimization on such reflector-type parasitics mechanism of the stand will drop essentially too.