

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А. Н. Сочнев
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка и исследование мехатронного модуля неравноплотного
сканирования пространства

15.04.06 Мехатроника и робототехника

15.04.06.01 Технология автоматизации и роботизации производства.

Научный руководитель	_____	_____	<u>Г. Б. Масальский</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А. А. Пархоменко</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	<u>П. Ф. Волков</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Продолжение титульного листа МД по теме разработка и исследование мехатронного модуля неравноплотного сканирования пространства.

Нормоконтролёр

подпись, дата

В.Н. Куликова

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		2

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ А. Н. Сочнев

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2019 г.

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме магистерской диссертации

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		3

Магистранту Пархоменко Андрею Александровичу

Группа ФЭ17–10М

Направление подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
магистерская программа 15.04.06.01 «Технология автоматизации и роботизации
производства».

Тема выпускной квалификационной работы «Разработка и исследование
мехатронного модуля неравноплотного сканирования пространства»

Утверждена приказом по университету № 15948/С от 3.11.17г

Руководитель ВКР Г.Б.Масальский, кафедра РИТК, канд.техн. наук,
доцент.

Исходные данные для ВКР:

Патент №230658, техническое задание, объект модернизации.

Перечень разделов ВКР:

Глава 1 – Обзор опорно-поворотных устройств

Глава 2 – Разработка динамической модели устройства

Глава 3 – Разработка проекта учебного стенда

Глава 4 – Разработка структуры системы управления

Глава 5 – Реализация траекторного управления

Глава 6 – Исследование системы управления

Перечень графического материала:

Лист 1 – Эскиз нелинейной кинематической передачи

Лист 2 – Эскиз учебного стенда

Лист 3 – Модель двухкоординатного дефлектора

Руководитель ВКР _____

Задание принял к исполнению _____

Г.Б. Масальский

А.А. Пархоменко

«__» _____ 20__ г.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка и исследование мехатронного модуля неравноплотного сканирования пространства» содержит 102 страницы текстового документа, 10 использованных источников, 2 приложения, 3 листа графического материала.

ДЕФЛЕКТОР, ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДЕФЛЕКТОР, НЕЛИНЕЙНАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА, SIMULINK, SIMMECHANICS, МОДЕЛИРОВАНИЕ, SILIDWORKS, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.

Целью работы является разработка и исследования модели нелинейной кинематической передачи (дефлектора).

Задачи проекта:

- анализ опорно-поворотных устройств (ОПУ);
- разработка 3D-модели механизма;
- разработка и исследование модели мехатронного модуля в среде SimMechanics;
- разработка проекта учебного стенда;
- разработка и исследование системы управления;
- планирование траектории мехатронного модуля;

В представленной магистерской диссертации разработана динамическая модель нелинейной кинематической передачи в среде SimMechanics, которая позволяет проводить исследования поведения механизма при различных воздействиях на него, также позволяет исследовать силы и моменты, возникающие в сочленениях, такие исследования будут актуальны при разработке физического прототипа механизма.

Разработаны алгоритмы системы управления нелинейной кинематической передачей, которые учитывают ее нелинейность и позволяют механизму пройти через заданные точки в пространстве.

Также разработаны 3D-модель механизма и проект учебного стенда. 3D-модель позволяет проводить исследования на прочность механизма, а учебный стенд наглядно демонстрирует работу механизма, и отражает его преимущества.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Обзор опорно-поворотных устройств.....	8
1.1 Устройство для ориентации антенны в двух плоскостях	13
2 Разработка динамической модели устройства.....	25
2.1 Разработка 3D-модели механизма.....	25
2.2 Описание среды моделирования SimMechanics	30
2.3 Описание принципа работы механизма.....	32
2.4 Разработка модели объекта эксперимента	34
2.5 Исследование разработанной модели	38
3 Разработка проекта учебного стенда.....	45
3.1 Описание двигателя ДБМ120-1-0,4-2	45
3.2 Выбор датчика положения	51
3.3 Описание абсолютного энкодера	53
3.4 Обзор разработанной конструкции привода	55
4 Разработка структуры системы управления.....	61
4.1 Прямая задача двухкоординатного дефлектора.....	61
4.2 Исследование адекватности динамической модели	67
4.3 Обратная задача двухкоординатного дефлектора	69
4.4 Модернизация динамической модели объекта	74
4.5 Реализация обратной задачи в Simulink	77
4.6 Проверка правильности реализации обратной задачи	80
4.7 Интеграция моделей двигателя и регуляторов в модель	82
5 Реализация траекторного управления.....	86
6 Исследование системы управления.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Листинг программы планирования траектории.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Листинг функции BackTask.....	104

ВВЕДЕНИЕ

В гражданской и военной областях деятельности существует множество систем сопровождения целей и наведения на цели, для этого применяются различные ОПУ. Основная проблема таких устройств заключается в их габаритах. Изобретение (патент №230658) позволяет существенно уменьшить габаритные размеры за счет своей конструкции и расположения приводов и двигателей в ее основании. Но при таком исполнении появляется проблема управления механизмом из-за существенной нелинейности. [1]

Изобретение может найти применение в качестве устройства управления различными оптическими и механическими элементами. В двухкоординатном дефлекторе вид механических связей позволяет осуществить практическую реализацию устройства с величиной механического люфта исполнительного элемента, ограниченного только люфтом практической реализации механических связей.

Преобразователь вращательного движения в колебательное в виде «оси с локальным изгибом – дисковый элемент» позволяет количественно трансформировать круговое вращение оси в угловое движение в одной плоскости с коэффициентом трансформации зависящим от углового изгиба оси [2].

Также изобретение может найти применение как опорно-поворотное устройство. Поэтому проведен анализ различных вариантов ОПУ и представлено сравнение с дефлектором.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 Обзор опорно-поворотных устройств

Опорно-поворотное устройство (ОПУ) относится к поворотным опорам антенных систем (АС) с механизмами их подъема и вращения, устанавливаемым на подвижных средствах, например, автомашинах, а также к ОПУ спутникового телевидения и измерительных антенных систем. ОПУ имеет в своем составе неподвижное основание, вращающуюся платформу, механизм вращения платформы вокруг вертикальной оси и подъема АС относительно горизонтальной оси с помощью электропривода и ручных приводов. Механизм вращения и подъема АС выполнены в виде системы соединенных последовательно планетарной и волновой дифференциальной передач. Одна часть этой системы передач используется для передачи вращающего момента от электродвигателя и ручного привода, вторая и третья части системы ответственны за подъем и вращение АС путем фиксации АС или платформы стопорными устройствами.

Устройство относится к антеннам, в том числе и к антеннам спутникового телевидения, а конкретнее к поворотным опорам антенн с механизмами их вращения, установленных на подвижных объектах, в том числе автомашинах.

Известно опорно-поворотное устройство, азимутальная часть которого представляет собой вертикальную колонну, основание которой закрепляется на фундаменте. Вращение антенны происходит благодаря поворачивающейся внутри колонны на двух подшипниках трубе, с помощью винтового толкателя с редуктором, установленным на платформе.

Один конец толкателя упирается с помощью гайки с карданным креплением в нижний угол рамы, другой конец соединен с редуктором.

Конструкция устройства для поворота антенны аналогична: привод устанавливаются на кронштейне колонны, один конец винтового толкателя с помощью гайки с карданным креплением упирается в специальный упор на платформе, другой конец соединяется с редуктором привода.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Недостатком этого опорно-поворотного устройства является его малый угол поворота вокруг азимутальной оси, определяемый длиной винтового толкателя азимутального устройства и необходимостью его перемещения, а также невозможность выполнения одним из приводов функций обоих приводов несмотря на единообразную конструкцию приводов угла места и азимутального.

Также известна установка фазированной антенной решетки, являющейся составной частью наземной радиолокационной станции (РЛС) и размещенной на передвижном автомобильном фургоне, с приводами, обеспечивающими вращение фазированной антенной решетки по азимуту с целью ее установки в определенной зоне и для наклона фазированной антенной решетки по углу места при развертывании из походного положения в рабочее.

Установка включает в себя ОПУ, фазированную антенную решетку, привод наклона фазированной антенной решетки с электродвигателем и ручным приводом, прикрепленным к нижней части корпуса ОПУ. Привод наклона установлен на крыше фургона. ОПУ имеет датчик азимута, снимающий информацию о положении ФАР. Установка содержит также привод поворота ФАР по азимуту с электродвигателем и ручным приводом. Корпус ОПУ состоит из двух частей с разъемом поперек оси вала азимутального привода, установленного в конических роликоподшипниках.

Недостатком данной ОПУ фазированной антенной решетки является ее автономность приводов наклона ФАР и приводов поворота ФАР по азимуту (автоматических и ручных), что приводит к нерациональным затратам средств на изготовление ОПУ и приводов и нерациональному использованию пространства автомобильного фургона.

За счет энергии оператора рефлектор переводится из положения транспортировки в рабочее положение.

Подобные конструкции антенных систем применяются совместно с рефлекторами малых размеров.

Применение высокоскоростных антенных систем с большими размерами зеркал антенн, снабженных управляемыми автоматизированными и ручными

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

приводами одновременно, приводит к использованию азимутальных и угломестных устройств с большими редукциями и вращающими моментами и сопряжено с большими габаритами антенных систем в целом и приводных устройств ОПУ.

Недостатками ОПУ, выбранного в качестве прототипа являются нерациональное использование пространства салона автомобиля, то есть большой объем заполнения салона автомашины в ущерб радиоаппаратуре большими поворотной опорой, приводами с механизмами, а также ручными приводами, блоками управления вращением, высокие трудозатраты и стоимость изготовления ОПУ с аппаратурой управления, сложность конструкций устройства подъема и вращения системы, а также большая величина момента инерции, и большая транспортируемая масса на подвижном объекте.

Объединение в одном электрическом приводе нескольких функций позволяет существенно (в несколько раз) снизить трудоемкость и стоимость изготовления ОПУ и электроаппаратуры.

ОПУ (вариант 1 на рисунке 1.1) содержит неподвижное основание, вращающуюся платформу, механизмы подъема и вращения АС, переходную часть антенны с возможностью ее фиксации относительно платформы по крайней мере в крайних положениях.

Механизмы подъема и вращения антенной системы ОПУ выполнены в виде системы из двух передач, генератор которой соединен с электродвигателем одним или несколькими и ручным приводом посредством одной или нескольких механических передач.

Выходной вал волнового редуктора посредством механической передачи одной, или нескольких передач соединен при помощи колеса-сателлита с платформой, разработанной с возможностью фиксации стопорным устройством относительно неподвижного основания.

ОПУ (вариант 2 на рисунке 1.2) содержащее неподвижное основание, вращающуюся платформу, устройства вращения платформы и подъема антенны, переходную часть антенны с возможностью ее фиксации относительно

										Лист
										10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

платформы по крайней мере в рабочем положении отличается тем, что механизмы выполнены в виде системы из планетарной дифференциальной передачи (ПДП), водило которой соединено по крайней мере с одним приводом, одно ее центральное колесо соединено через корпус передачи с переходной частью антенны, а другое с выходным валом, соединенным одной или несколькими механическими передачами с вращающейся платформой, которая через сателлит и водило и неподвижное колесо фиксируется относительно неподвижного основания стопорным механизмом.

Отличительной особенностью варианта 3 (рисунок 1.3) ОПУ является выполнение механизмов подъема и вращения антенной системы в виде расположенной вертикально волновой дифференциальной передачи, генератор волн которой соединен с одним приводом, одно ее колесо соединено с корпусом передачи, другое через ее выходной вал и механическую передачу с платформой, которая может фиксироваться стопорными механизмом. Корпус передачи соединен с валом вращения антенны одной или несколькими механическими передачами [3].

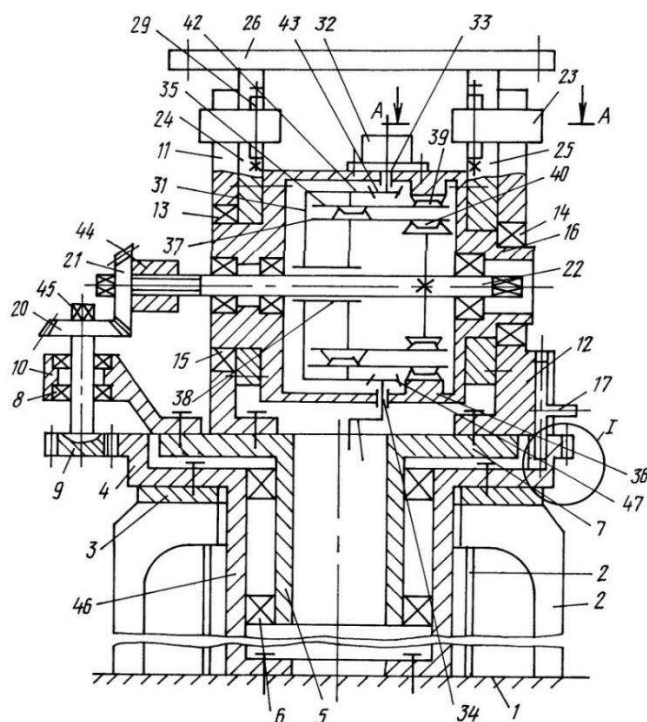


Рисунок 1.1 – Устройство ОПУ (вариант 1)

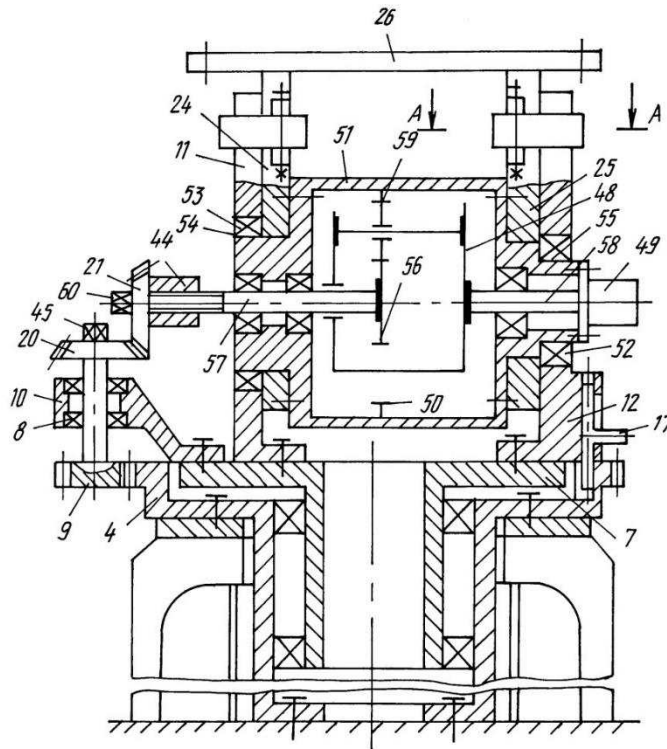


Рисунок 1.2 – Устройство ОПУ (вариант 2)

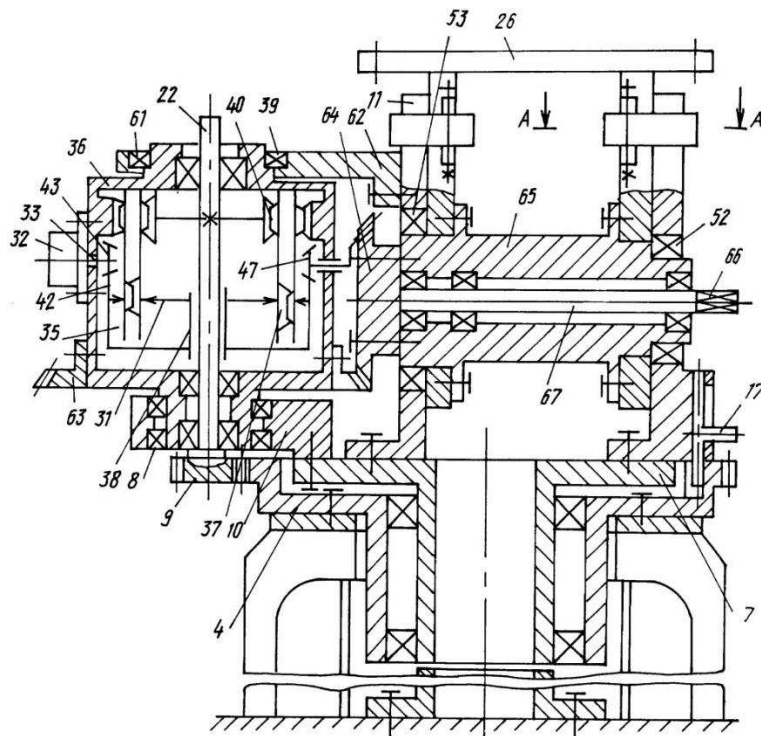


Рисунок 1.3 – Устройство ОПУ (вариант 3)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

12

1.1 Устройство для ориентации антенны в двух плоскостях

Использование: механизмы для пространственной ориентации объектов.

Сущность изобретения: устройство содержит взаимно перекрещивающиеся оси 3, 5, установленные на внутренней 4 и внешней 2 рамках. Оси рамок расположены неортогонально, причем неортогональность осей составляет 3-10°.

Изобретение относится к механизмам для пространственной ориентации объектов.

Известно устройство для поворота антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, содержащее внутреннюю и внешнюю взаимно перпендикулярные рамки, кинематически связанные с автономными приводными двигателями.

Известное устройство ориентации антенны относительно движущегося объекта не обеспечивает выборку ошибки, связанной с неточностью взаимного углового расположения осей вращения рамок, так как такая установка с неточностью до нескольких угловых минут требует для выборки ошибки близких к нулю значений требуемой скорости в диапазоне регулирования по оси внешней рамки при угломестном перемещении антенны. Такое регулирование потребовало бы большой редукции скорости приводного двигателя по внешней оси, поэтому эта скорость берется равной нулю, т.е. не регулируется, следовательно, ошибка остается.

Целью изобретения является повышение точности ориентации антенны относительно движущегося объекта путем увеличения уровня скоростного диапазона привода.

Это достигается тем, что устройство ориентации антенны содержит связанные с автономными приводами внешнюю и внутреннюю рамки, оси которых расположены неортогонально, причем неортогональность составляет 3-10°, что позволяет устранить указанную ошибку ориентации антенны, поскольку при неортогональной установке осей многократно возрастает требуемая

скорость по внешней оси, и отработка этой скорости двигателем привода, приводящая к выборке ошибки, становится возможной.

На рисунке 1.4 изображено предложенное устройство; на рисунке 1.5 представлена его плоская схема.

Антенна 1 установлена на внутренней рамке 2, имеющей возможность поворота относительно оси 3, жестко закрепленной в рамке 4, имеющей возможность поворота вокруг оси 5, установленной жестко в корпусе 6. Внешняя ось 5 и внутренняя ось 3 устройства расположены неортогонально и кинематически связаны с автономными приводами (на чертеже не показано).

Установка осей 3,5 с неортогональностью от 3 до 10°, т.е. сообразно требуемому начальному углу места, позволяет свести к нулю влияние неточности угла установки внешней и внутренней осей при ориентации антенны по отношению к движущемуся объекту.

Устройство для ориентации антенны в двух плоскостях, содержащее внутреннюю и внешнюю рамки с взаимно перекрещивающимися осями, кинематически связанные с автономными приводами, отличающееся тем, что, с целью улучшения точности ориентации антенны относительно движущегося объекта путем увеличения уровня скоростного диапазона привода, оси внутренней и внешней рамок расположены неортогонально, причем неортогональность осей составляет 3 - 10°[4].

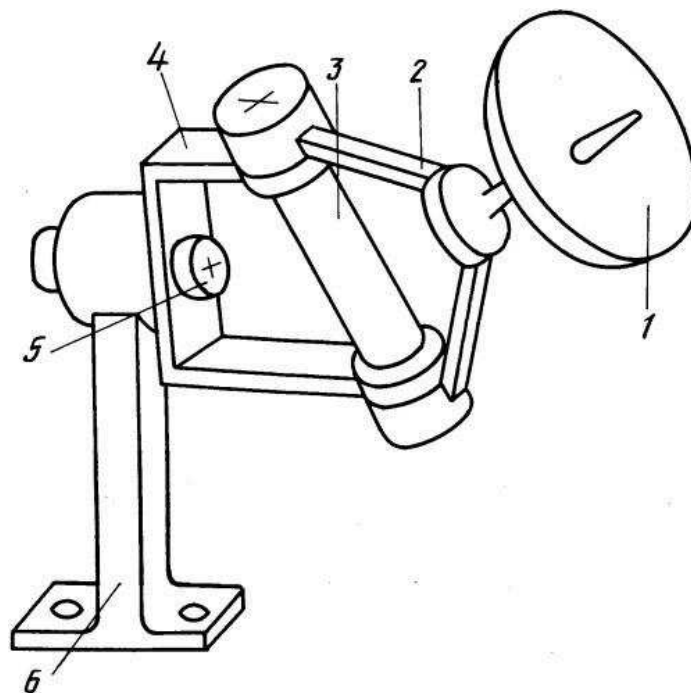


Рисунок 1.4 – Устройство для ориентации антенны в двух плоскостях

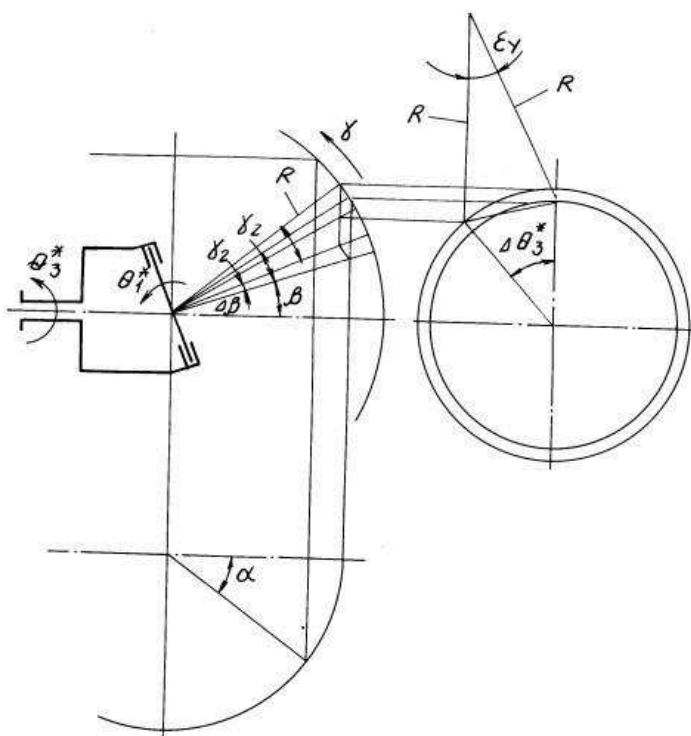


Рисунок 1.5 – Зона достижимости

Сфера применения: зеркальные антенны, ОПУ с полярной подвеской.
 Описание изобретения: полярная ось шарнирно закреплена на стойке. С полярной осью соединена дугообразная тяга механизма угломестных установок.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

15

Тяга 5 пропущена через стойку 1. Направляющая дугообразная тяга устройства орбитальных установок закреплена на раме 16. Тяги соединяются стопорным элементом. На концах полярной оси шарнирно установлен механизм коррекции угла места, который выполнен в виде шарниров, которые взаимодействуют с дугообразными тягами, концентричными тяге угломестного механизма и закрепленными на раме рефлектора.

Устройство относится к антенной технике, в частности к ОПУ для ориентации антенны с полярной подвеской на спутники, расположенные на орбите Земли.

Известно устройство для ориентации антенны, содержащее карданный подвес, на осях которого расположены стопоры, соединяющие антенну с корпусом винтового механизма, который соединен с корпусом и антенной сферическими шарнирами, при этом винтовой механизм смещен относительно осей подвеса.

Вращение антенны вокруг оси корпуса сразу же собьет настройку. Для ориентации антенны, то есть возврата ее на орбиту придется использовать часть длины винтового стержня, Таким образом длина стержня должна позволять перемещать антенну в вертикальной плоскости от 0 до 90° и в горизонтальной от 0 до 180°, представленная конструкция не позволяет этого делать. Кроме того, использование такой схемы закрепления винтового механизма приводит к уменьшению плеча поворота антенны при отдалении от среднего положения, а это, в свою очередь, снижает жесткость установки антенны, к этому же ведет и применение шарниров.

К недостаткам этого устройства можно отнести невысокая точность отслеживания геостационарной орбиты из-за отсутствия полярной оси и оси коррекции антенны, которая должна располагаться на геометрической оси рефлектора.

В опорно-поворотном устройстве, содержащем стойку, раму с установленным на ней рефлектором, угломестный механизм, механизм орбитальных установок, направляющая тяга которого выполнена в форме дуги,

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

согласно изобретению направляющая тяга угломестного механизма также имеет дугообразную форму и пропущена через стойку с возможностью перемещения-стопорения в ней, а концы тяги закреплены на корпусе полярной оси, шарнирно взаимодействующем по торцам с механизмом коррекции угла места, связанным с рамой, которая при этом соединена с направляющей тягой механизма орбитальных установок перпендикулярной к направляющей тяге угломестного механизма и обе тяги соединены между собой в средних точках стопорным элементом с возможностью перемещения-стопорения относительно друг друга, причем центры дугообразных тяг совпадают с осью шарнира, соединяющего стойку с полярной осью.

Кроме того, для расширения технологических возможностей конструкции, стойка с нижнего конца снабжена фланцем, установленным под углом 45° к ее оси, плоскость которого параллельна шарнирной оси. Это позволяет расширить диапазон угломестных установок до 90° .

Механизм коррекции угла места выполнен в виде опорно-поворотных шарниров, взаимодействующих с направляющими дугообразными тягами, концентричными направляющей тяге угломестного механизма и пропущенных сквозь втулки аналогичной конфигурации с возможностью перемещения-стопорения в них. При этом тяги механизма коррекции угла места консольно закреплены на раме рефлектора. Это позволяет корректировать положение рамы рефлектора относительно полярной оси при смене географического положения антенны.

Одним из вариантов осуществления стопорения является использование пары винт-гайка, для чего направляющие тяги механизмов установки угла места и орбитального выполнены с винтовой нарезкой.

Стопорный элемент, соединяющий средние точки направляющих тяг механизмов выполнен в виде планки с взаимоперпендикулярными отверстиями на концах с пропущенными с возможностью перемещения-стопорения через одно из них тяги угломестного механизма, а через другое - тяги механизма орбитальных установок. Это позволяет, во-первых, настраивать опорно-

поворотное устройство на сигналы спутников геостационарной орбиты плавно и точно, во-вторых, стопорный элемент является замыкающим звеном в конструкции всего устройства, предающим ей жесткость в установленном положении.

Стопорный элемент механизма может быть представлен также в виде редуктора, например, червячного с электроприводом, установленного корпусом с возможностью перемещения-стопорения на направляющей тяге угломестного механизма, а тяга механизма орбитальных установок с винтовой нарезкой пропущена сквозь резьбовое отверстие в ведомом колесе, например, червячном. Такое выполнение стопорного элемента позволяет дистанционно управлять ОПУ при переходе на прием сигналов другого спутника орбиты.

Также стопорный элемент может быть представлен в виде электродвигателя, например, с плоским ротором, корпус которого закреплен с возможностью перемещения на направляющей тяге угломестного механизма, а тяга устройства орбитальных установок с винтовой нарезкой пропущена сквозь резьбовое отверстие в валу ротора, что упрощает конструкцию за счет исключения редуктора.

На рисунке 1.6 изображено опорно-поворотное устройство антенны, общий вид; на рисунке 1.7 - вид по стрелке А на опорно-поворотное устройство; на рисунке 1.8 - узел механизма коррекции угла места.

Опорно-поворотное устройство содержит стойку 1 с фланцем 2 на нижнем конце, плоскость которого расположена под углом 45° к ее оси для расширения диапазона регулирования, стопорные винты 3, служащие для закрепления опорно-поворотного устройства на штырьевой опоре, втулку 4, повторяющую конфигурацию пропущенной сквозь нее дугообразной направляющей тяги 5 угломестного механизма и лимб 6 для контроля угломестных установок. Стойка 1 соединена шарниром 7 в середине длины корпуса 8 полярной оси 9, при этом геометрическая ось шарнира 7 пересекает и перпендикулярна полярной оси 9. Изменение угломестного координирования осуществляется гайками 10, а отсчет ведется по лимбу 6 стрелкой 11. На концах корпуса 8 закреплены концы тяги 5

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

угломестного механизма, так что центр изгиба ее совпадает с геометрической осью шарнира 7. В торцах корпуса 8 установлены опорно-поворотные шарниры 12 с изогнутыми втулками 13, в которых закреплены гайками 14 дугообразные тяги 15 механизма коррекции угла места, концентричные тяге угломестного механизма и консольно закрепленные на раме 16, на которой установлен рефлектор 17. На свободном конце верхней тяги 15 закреплена стрелка 18, а на верхнем конце тяги 5 механизма угломестных установок выполнена лыска, на которой нанесен лимб 19 для отсчета угла коррекции рамы 16 с рефлектором 17, оснащенной дугообразной тягой 20 механизма орбитальных установок, закрепленной на ней в плоскости перпендикулярной плоскости рамы, а также плоскости, в которой расположена тяга 5 механизма угломестных установок, при этом центр изгиба тяги 20 совпадает с центром изгиба тяги 5 и расположен на полярной оси 9. Средние точки тяг 5 и 20 соединены стопорным элементом 21 с возможностью перемещения-стопорения относительно друг друга посредством гаек 22 и 23, имеющих 3-5 витков. Стопорный элемент 21 является замыкающим элементом металлоконструкции опорно-поворотного устройства и может быть выполнен в виде бруска, полой прямоугольной или круглой трубы с двумя взаимоперпендикулярными отверстиями на концах, в которые пропущены тяги 5 и 20.

Функцию стопорного элемента 21 может выполнять корпус редуктора, например, червячного, который закрепляется с возможностью перемещения-стопорения на тяге 5 угломестного механизма, а сквозь червячное колесо с резьбовым отверстием в центре пропущена тяга 20 механизма орбитальных установок. О положении редуктора на тяге 20 судят по сигналам датчика, например, индукционного.

Функцию стопорного элемента 21 может выполнять также корпус электродвигателя, преимущественно с плоским якорем (ротором), например, ПЯ-250, ПДПР и подобные им, который закрепляется непосредственно, либо через кронштейн с возможностью перемещения-стопорения на тяге 5, а сквозь резьбовое отверстие в валу электродвигателя пропущена тяга 20.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

его применение увеличивает точность настройки и снижает стоимость антенны по сравнению с использованием для дистанционной настройки редукторной пары. Патент ФРГ N 3704345 [5].

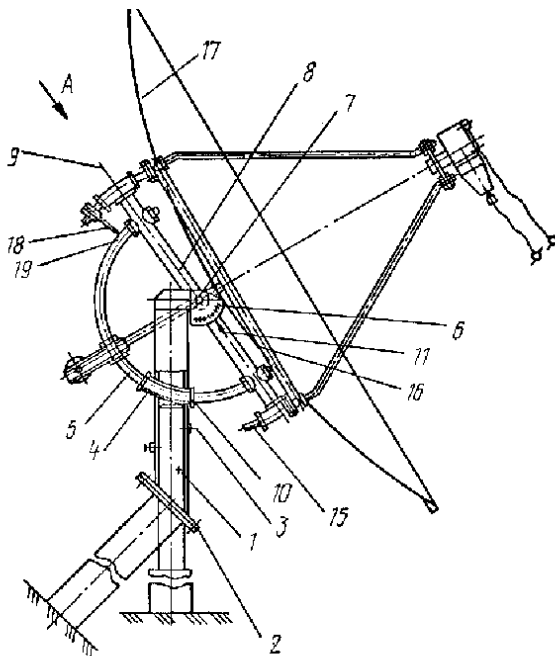


Рисунок 1.6 – Опорно-поворотное устройство антенны, общий вид

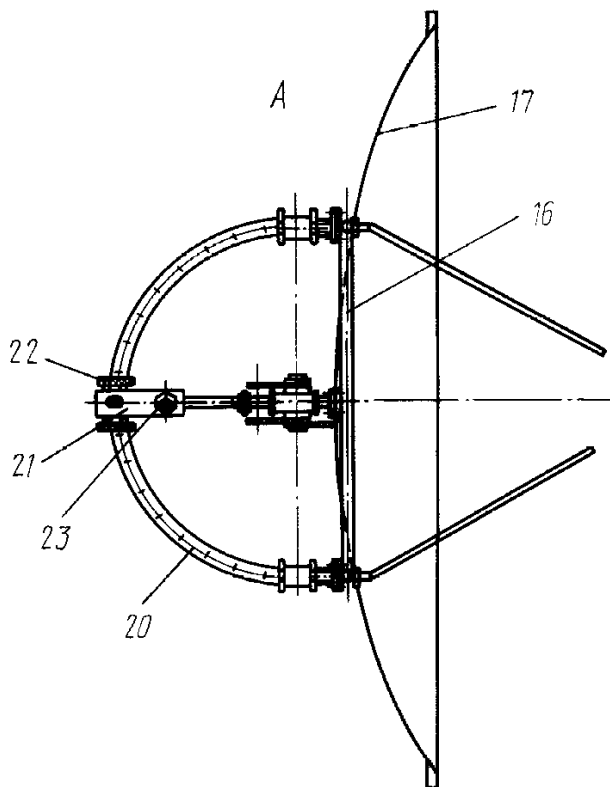


Рисунок 1.7 – Опорно-поворотное устройство. вид по стрелке А

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

21

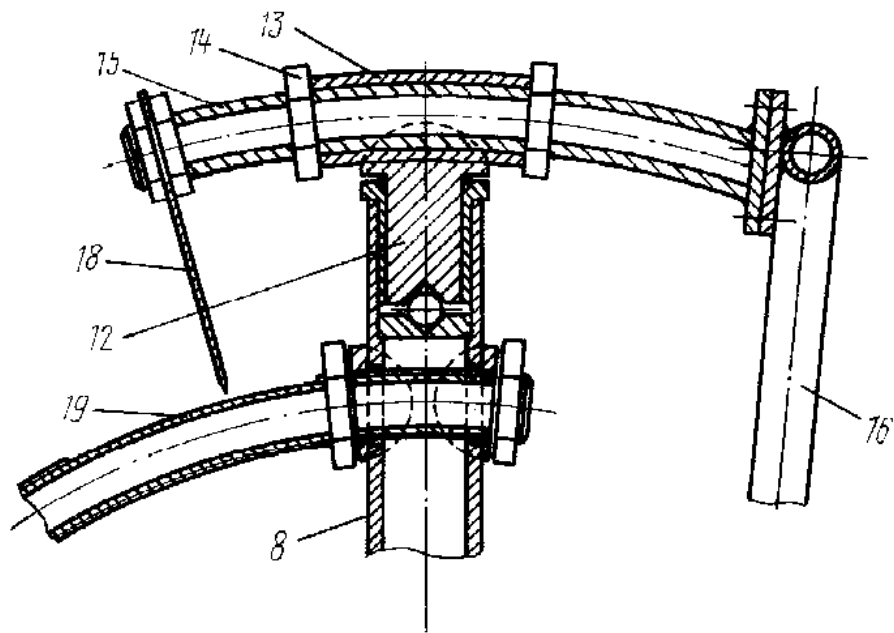


Рисунок 1.8 – Узел механизма коррекции угла места

Выполнив незначительные упрощения, все кинематические схемы можно свести к одной общей простой кинематической схеме, которая представлена на рисунке 1.9.

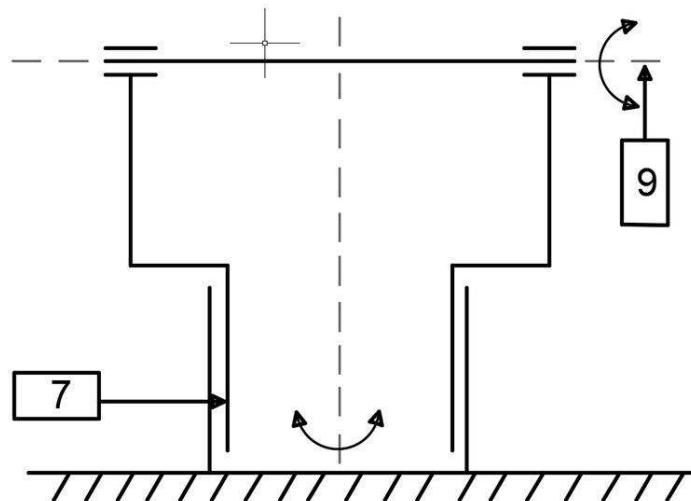


Рисунок 1.9 – Упрощенная кинематическая схема ОПУ

В таких конструкциях провода располагаются в разных местах, таким образом, привод на ось вращения располагают в основании ОПУ, а привод на ось

наклона располагают непосредственно на данной оси сбоку. Расположение привода на оси наклона увеличивает габаритные размеры устройства.

Также существует вариант конструкций с одним приводом для перемещения по обеим осям. В таком случае, требуется определенное количество зубчатых передач, которое определяется конструкторским решением, что усложняет обслуживание такой установки.

Кинематическая схема дефлектора представлена на рисунке 1.10.

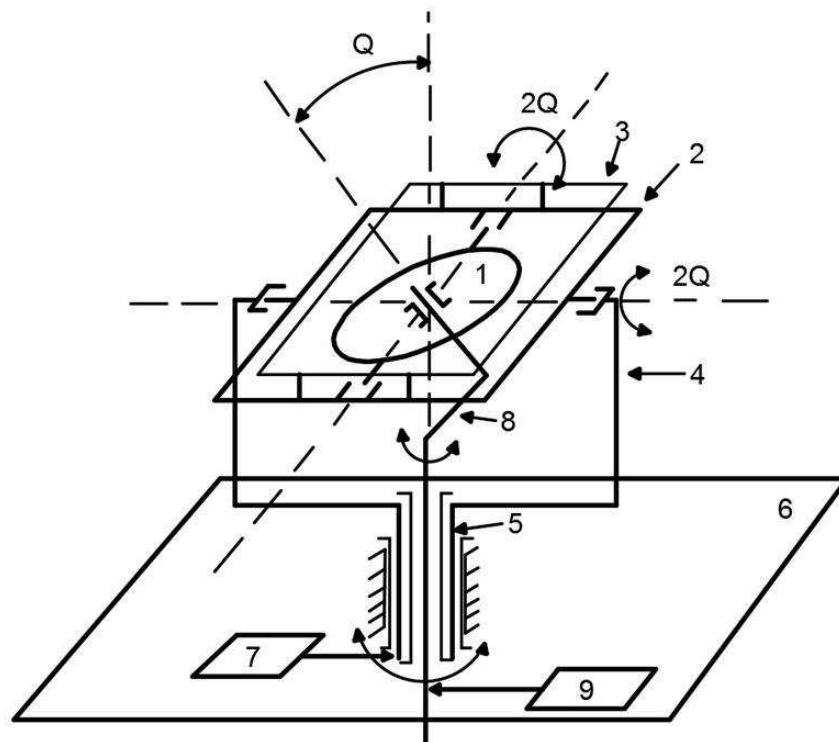


Рисунок 1.10 – Кинематическая схема дефлектора

«Заявляемое техническое решение - двухкоординатный дефлектор - поясняется чертежом, где представлена кинематическая схема взаимодействия элементов. Дисковый элемент 1 размещен внутри плоскости внутреннего рамочного элемента 2 и связан подвижно с первой парой его противоположных сторон двумя осями. Исполнительный элемент 3 закреплен на внутреннем рамочном элементе 2 над дисковым элементом 1. Вторая пара противоположных сторон внутреннего рамочного элемента 2 связана подвижно двумя осями с внешним рамочным элементом 4. А внешний рамочный элемент 4 связан

подвижно полой осью 5 с основанием 6 и электроприводом 7. Центральная ось 8 со стороны локального изгиба проходит через центр дискового элемента 1 по нормали к его плоскости, а своим прямым участком проходит внутри полой оси 5 по нормали к основанию 6 и обеспечивает подвижную связь дискового элемента 1 с основанием 6 и электроприводом 9. При этом положение плоскости дискового элемента по отношению к оси устройства приобретает некоторый угол Q , равный углу локального изгиба центральной оси 8 относительно оси симметрии устройства. Примером конкретного выполнения подвижных связей между элементами может быть, например, соединение ось в подшипнике.»

Данная конструкция не требует установки зубчатых передач, что упрощает обслуживание такого устройства. Также такое решение позволяет расположить все приводы в основании конструкции, при этом уменьшаются габаритные размеры и улучшаются массогабаритные характеристики. Схему дефлектора можно немного преобразовать, чтобы отличия были более заметны. На рисунке 1.11 представлена преобразованная схема.

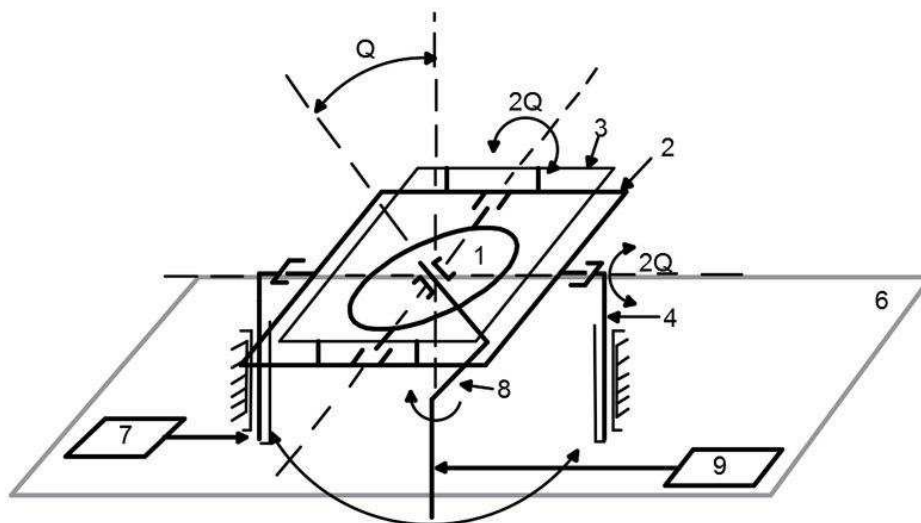


Рисунок 1.11 – Преобразованная кинематическая схема дефлектора

На преобразованной схеме видно, что ось наклона можно расположить ниже, что приведет к увеличению жесткости конструкции.

2 Разработка динамической модели устройства

Целью проводимых экспериментов является определение свойств и характера поведения модели объекта, анализ адекватности отражения моделью свойств объекта.

Проводимые эксперименты носят исследовательский характер.

Эксперименты будут проводиться на динамической модели разработанной в среде моделирования SimMechanics. Следовательно, вид испытаний – компьютерное моделирование.

Длительность проводимых экспериментов принята 4 секунды для анализа выявления нелинейностей системы, так как этого времени будет достаточно в рамках работы. Для анализа динамических свойств модели времени эксперимента 4 секунды оказалось недостаточно, поэтому было принято решение увеличить длительность эксперимента до 20 секунд. Эксперимент длительностью 20 секунд позволяет оценить динамические характеристики разработанной модели механизма.

Задачи, поставленные на данном этапе разработки:

- подобрать конструкционные размеры двухкоординатного дефлектора
- создать 3D-модель в среде трехмерного моделирования
- создать динамическую модель в среде SimMechanics
- определить адекватность модели
- исследовать динамические характеристики модели.

2.1 Разработка 3D-модели механизма

Для построения 3D-модели была выбрана среда SolidWorks. Данная среда также позволяет определить массовые характеристики как модели в целом, так и каждого компонента в отдельности. В будущем для исследования динамических характеристик механизма нам будут необходимы данные массовые характеристики компонентов модели.

									МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						25

Разрабатывая компоненты механизма, будем переносить систему координат в необходимое нам место расположения.

Анализируя механику механизма было замечено что внутренний контур (промежуточное звено) представляет из себя прямоугольный треугольник (рисунок 2.1). Угол гамма γ определяет максимальный угол наклона выходного звена. Для экспериментов выберем удобные для экспериментов длины катетов и гипотенузы.

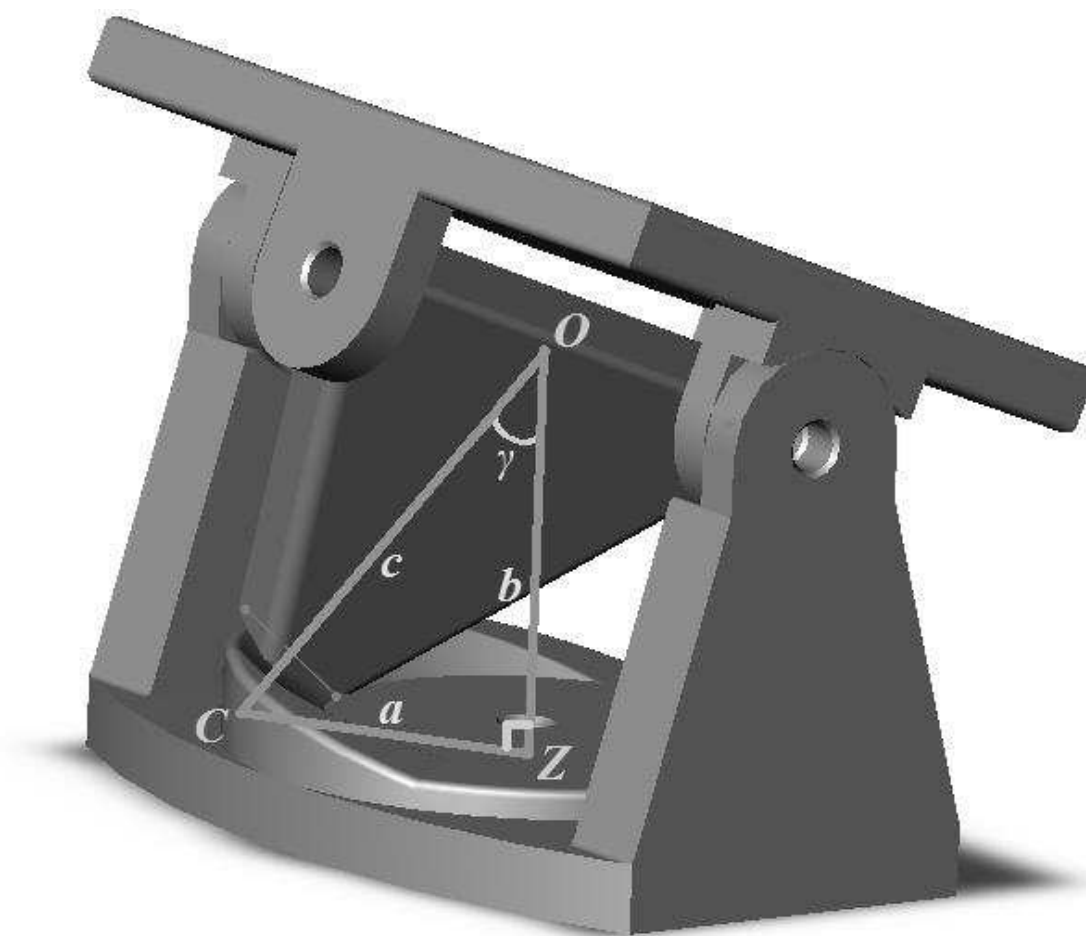


Рисунок 2.1 – Представление промежуточного звена

Задача сводится к тому, чтобы подобрать такие длины катетов и гипотенузы, чтобы они были целочисленными. Применяя теорему Пифагора (1.1) определим длины катетов.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.1)$$

Исходя из условий задачи удобными для вычислений размерами являются следующие размеры:

длина гипотенузы равна 50мм;

длина катета (по вертикали) равна 40 мм;

длина катета (по горизонтали) равна 30 мм.

Проверяем условие

$$50 = \sqrt{30^2 + 40^2} = \sqrt{900 + 1600} = \sqrt{2500}$$

Приняв данные условия, вычислим угол γ :

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{30}{50}\right) = \arcsin(0.6) = 36.87$$

Как видим условие выполняется

Теперь проведем построение модели согласно данным условиям.

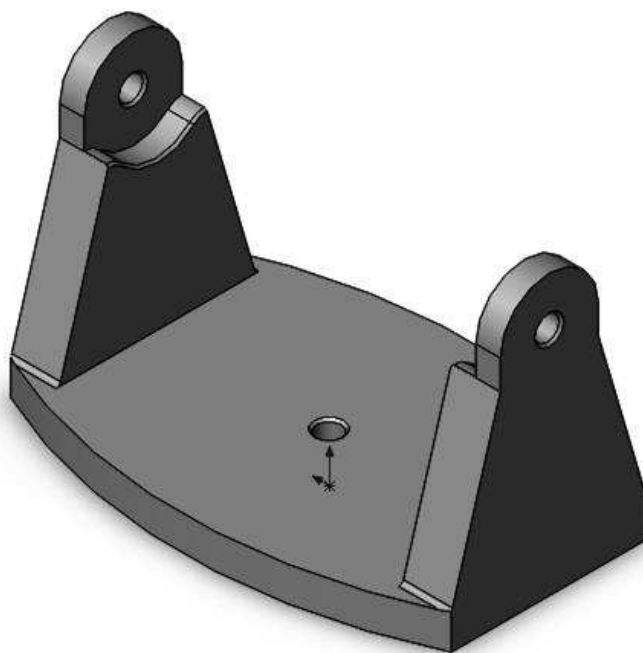


Рисунок 2.2 – Деталь 1 (основание)

									Лист
									27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

МД – 15.04.06 ПЗ

На рисунке 2.2 представлена рамка нашего механизма. В данном случае, под условие нам нужно подобрать только высоту, соответствующую длине катета (по вертикали).

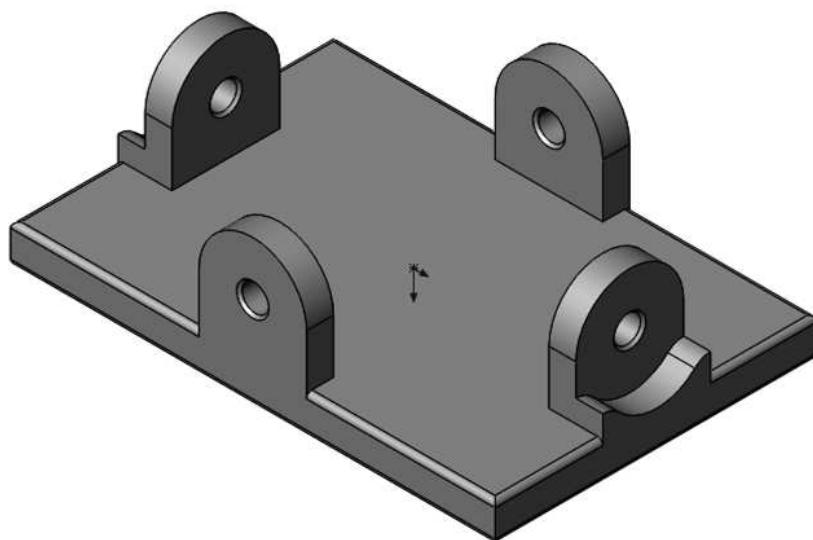


Рисунок 2.3 – Деталь 2 (платформа)

На рисунке 2.3 представлена модель выходного звена. Условия задачи не затрагивают данный компонент, его размеры определяются только сопрягающимися с ним деталями.

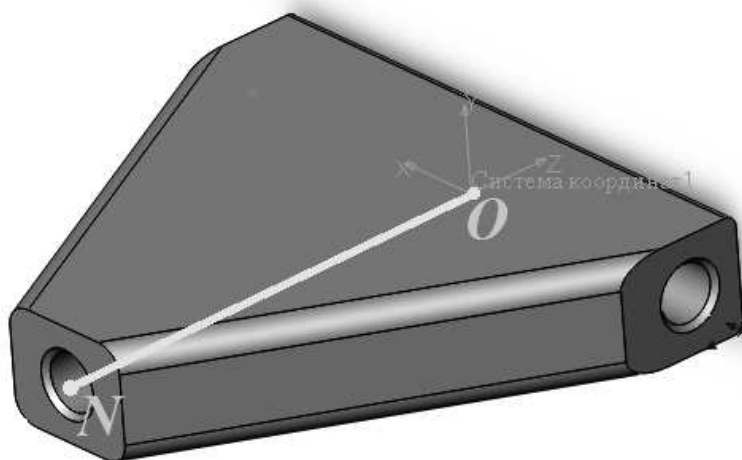


Рисунок 2.4 – Компонент внутренней конструкции №1

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На рисунке 2.4 изображен компонент внутренней конструкции, для данного звена важно, чтобы размер ON (от начала системы координат до края детали) не превышал длины гипотенузы c .

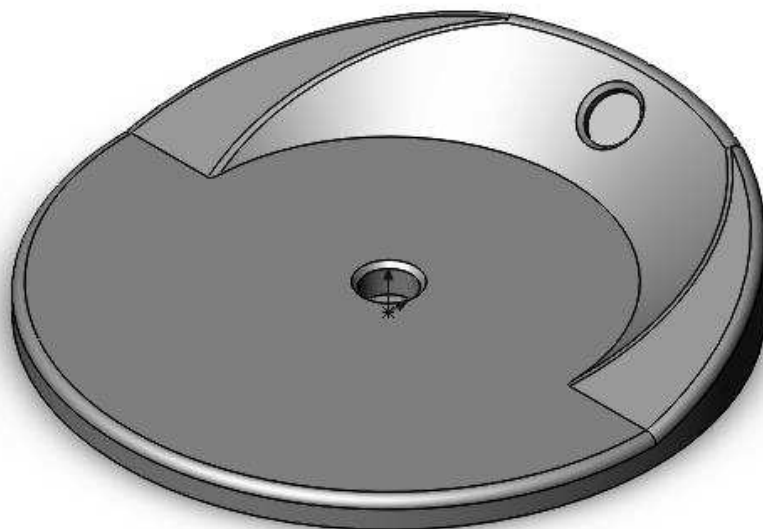


Рисунок 2.5 – Компонент внутренней конструкции №2

Второй компонент промежуточного звена напрямую связан с условиями нашей задачи, его размеры должны опираться на наши расчетные данные, а именно его касается катет CZ (катет a).

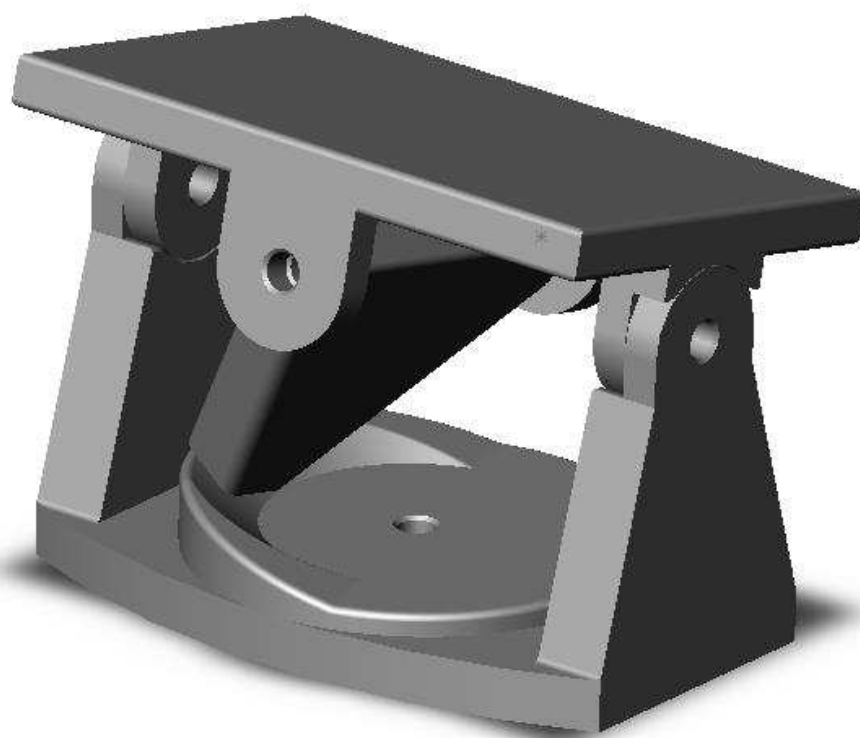


Рисунок 2.6 – Сборка в SolidWorks

Модель разработана в SolidWorks и полностью работоспособна.

Следующим этапом является интеграция данной сборки в среду моделирования SimMechanics. Приведенные 3D-модели позволяют вычислить массовые характеристики компонентов механизма, а также они служат для визуализации работы модели, разработанной в SimMechanics. Благодаря этому можно легко обнаружить ошибки, совершенные при проектировании модели механизма.

2.2 Описание среды моделирования SimMechanics

SimMechanics предоставляет среду для трёхмерного моделирования многотельных механических систем, таких как:

- роботы;
- подвески транспортных средств;
- строительное оборудование;
- посадочные устройства самолетов.

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

С помощью этого инструмента можно моделировать многотельные системы используя блоки, которые моделируют тела, соединения, ограничительные связи и элементы силы.

На основе построенной системы из блоков в редакторе, SimMechanics формулирует и решает уравнения движения для всей механической системы.

Модели из CAD систем могут быть импортированы в SimMechanics вместе с информацией о массе, инерции, соединениях, ограничениях и 3D геометрии импортируемых моделей. SimMechanics автоматически генерирует 3D анимацию для визуализации динамики системы.

Можно параметризовать модели при помощи переменных и выражений в MATLAB и проектировать системы управления для многотельных систем в Simulink. Можно добавлять электрические, гидравлические, пневматические и другие компоненты к механической модели при помощи Simscape и проверять всю систему в одной среде моделирования. Для взаимодействия с другой средой моделирования, SimMechanics поддерживает генерацию C кода (с использованием Simulink Coder™).

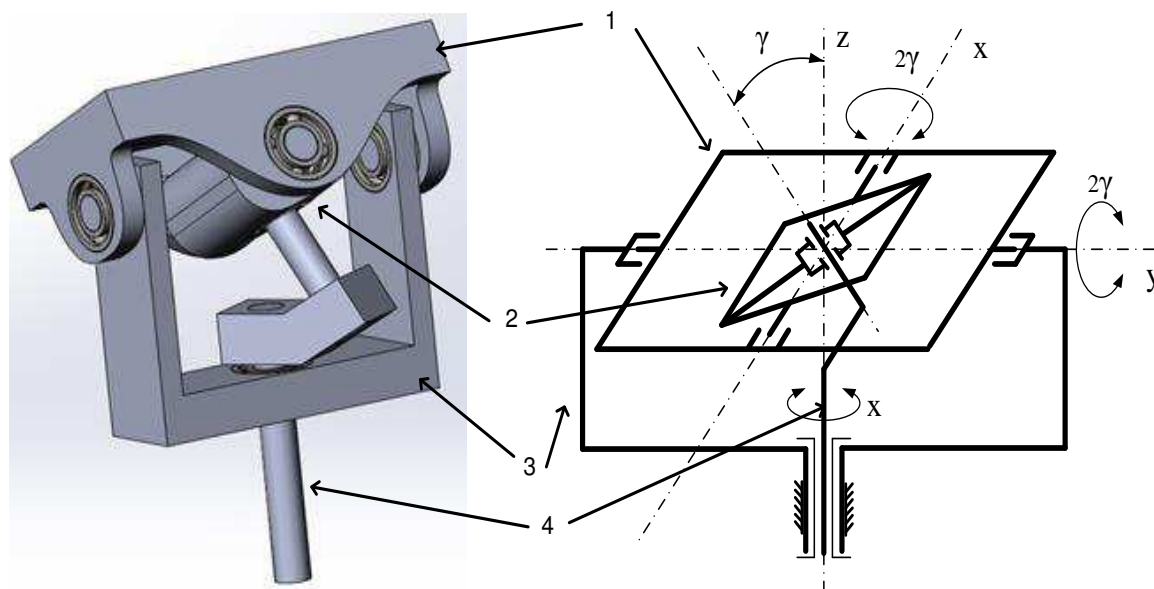
SimMechanics позволяет создавать библиотеки компонентов, благодаря этому компоненты могут быть использованы в различных проектах.

Тела определяются массой, инерцией и точками соединения. Сложные тела можно представить набором простых фигур, таких как сферы, цилиндры и экструзии определенные в MATLAB и SimMechanics. На определяющей тело блок-схеме отображаются все связи с телом, что упрощает вид топологии системы. При помощи скриптов MATLAB можно вычислять параметры, такие как длина и масса.

Можно накладывать ограничения и связи на тела. Этим определяются степени свободы между телами в системе, которые определяют то, как система может перемещаться. Можно подключать виртуальные приводные механизмы к соединениям, чтобы приводить их в движение.

2.3 Описание принципа работы механизма

На рисунке 1а изображен внешний вид двухкоординатного дефлектора, на рисунке 1б представлена его кинематическая схема.



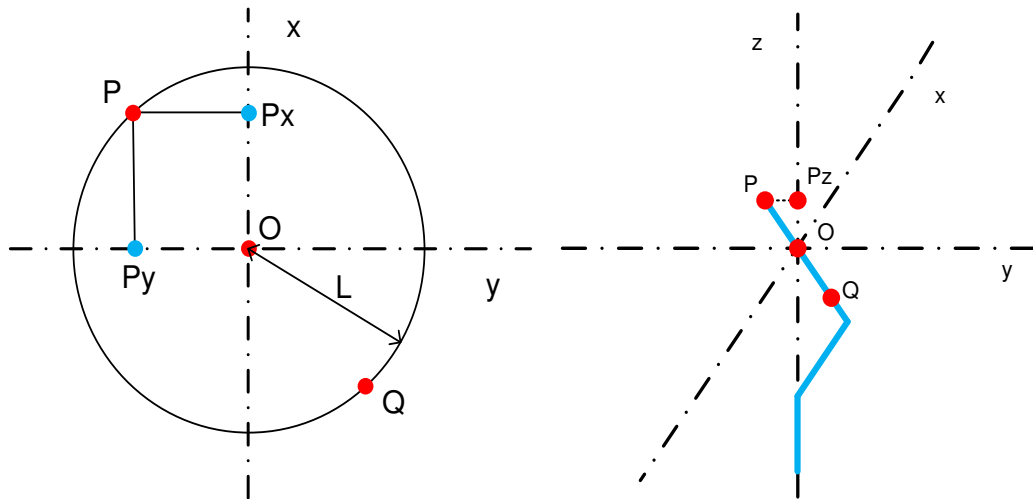
а) – визуализация,

б) – кинематическая схема

Рисунок 2.7 – Однокоординатный дефлектор

Принцип работы: момент с двигателя подается на входной вал 4, который приводит в движение промежуточное звено 3. Промежуточное звено приводит в движение выходное звено 1, которое совершает колебательные движения с амплитудой, определяемой углом изгиба γ промежуточного звена.

Вычислим зависимость угла отклонения выходного звена от угла поворота входного вала, а также передаточное отношение механизма. Из кинематической схемы механизма видно, что выходное звено повторяет проекцию движения части входного вала, соединенной с промежуточным звеном на плоскость ZOY.



Q – точки в центрах подшипников промежуточного звена и входного вала, O – точка пересечения всех осей вращения механизма, Pz – проекция точки P на ось z

Рисунок 2.8 – Точки касания входным валом промежуточного звена и их проекции на плоскость XOY

Угол отклонения выходного вала легко определить, зная длины сторон проекции треугольника POPz на плоскость ZY. Пусть Py проекция точки P на плоскость ZY, тогда проекцией на плоскость ZY треугольника POPz будет являться треугольник PyOPz. Отрезок OPz является общим для двух треугольников и может быть вычислен как $l * \cos \gamma$, где l – длина отрезка OP. Тогда длина отрезка PPz вычисляется как $l * \sin \gamma$, а длина отрезка PyPz – $l * \sin \gamma * \cos \alpha$, где α – угол поворота входного звена вокруг оси OZ относительно оси OY. Тогда угол поворота входного звена можно определить как арктангенс угла PyOPz.

Таким образом, β – угол отклонения отрезка OP от оси OZ в плоскости ZOY вычисляется по формуле:

$$\beta(x) = \arctan\left(\sin x \cdot \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}\right) = \arctan(\sin x \cdot \tan \gamma) \quad (2.1)$$

2.4 Разработка модели объекта эксперимента

На рисунке 2.10 представлен динамическая модель дефлектора.

Из модели на рисунке 2.4 видно, что она представляет собой замкнутый контур, это обусловлено самой конструкцией механизма. Рассмотрим подробнее всю модель по частям.

Построение модели в SimMechanics начинается с определения фиксированной точки (основания). В рамках нашей задачи за основание мы примем вращающуюся рамку физической модели, так как сложность состоит в построении именно внутренней части механизма.

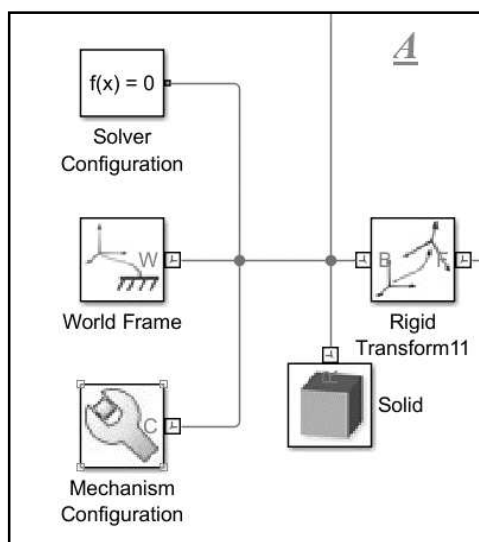


Рисунок 2.9 – Фрагмент А из модели

Для интеграции в SimMechanics 3D-моделей необходимо предварительно сохранять их в формате .step, так как другие форматы данная среда моделирования не поддерживает. Также блок типа Solid может вычислить массовые характеристики исходя из 3D-визуализации объекта, потребуется задать только плотность материала из которого сделан объект. Поэтому необходимо настроить все параметры согласно рисунку 2.4. значение переменной «Plotn» задаем в созданном нами m-файле.

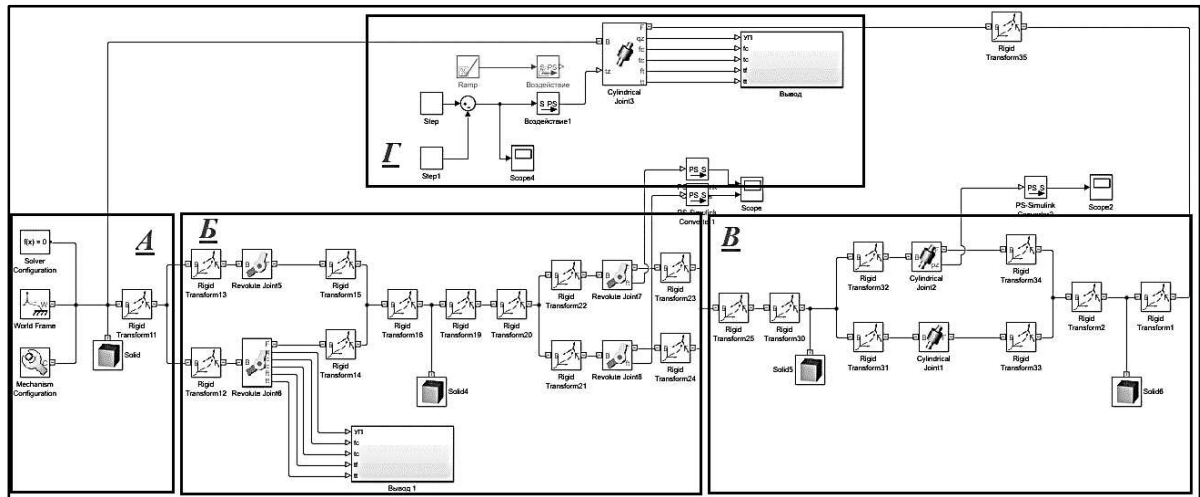


Рисунок 2.10 – Схема нелинейной кинематической передачи в среде SimMechanics

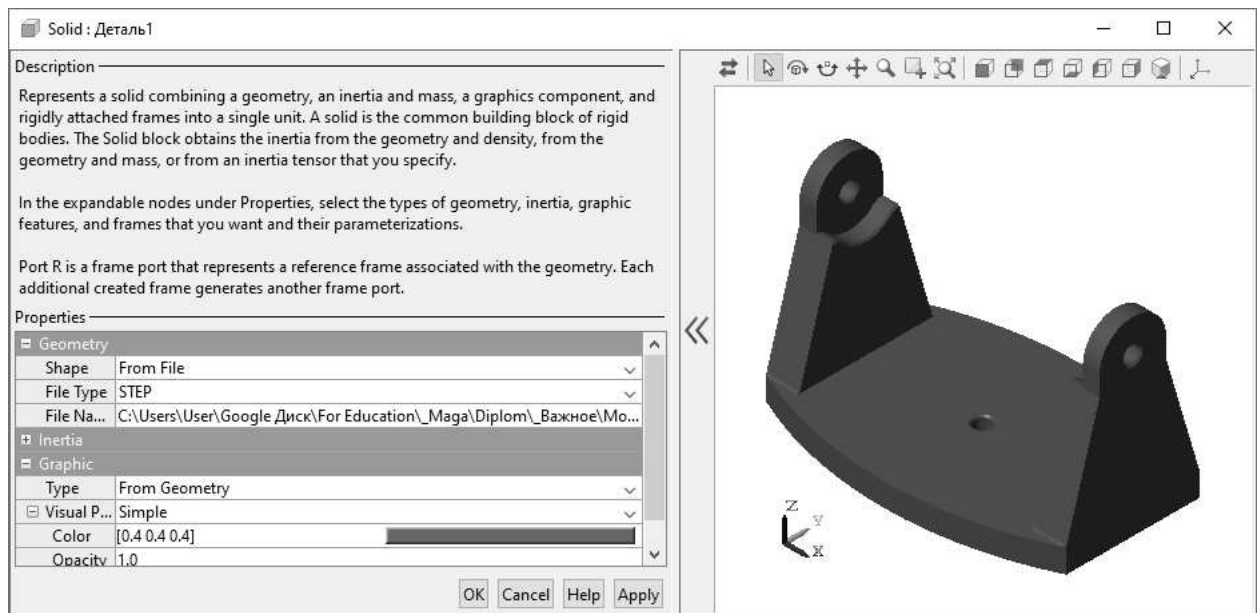


Рисунок 2.11 – Свойства блока типа Solid

Аналогичным образом настраиваем все блоки типа Solid. Далее настраиваем ограничения между компонентами модели, то есть выбираем тип сочленения между компонентами. В данных случаях это будут Revolute Joint (сочленения вращательного типа). Из 3D-сборки видно, что последующие сочленения имеют 2 точки опоры, и нагрузка разделяется между ними поровну, следовательно, устанавливаем эти сочленения параллельно друг другу.

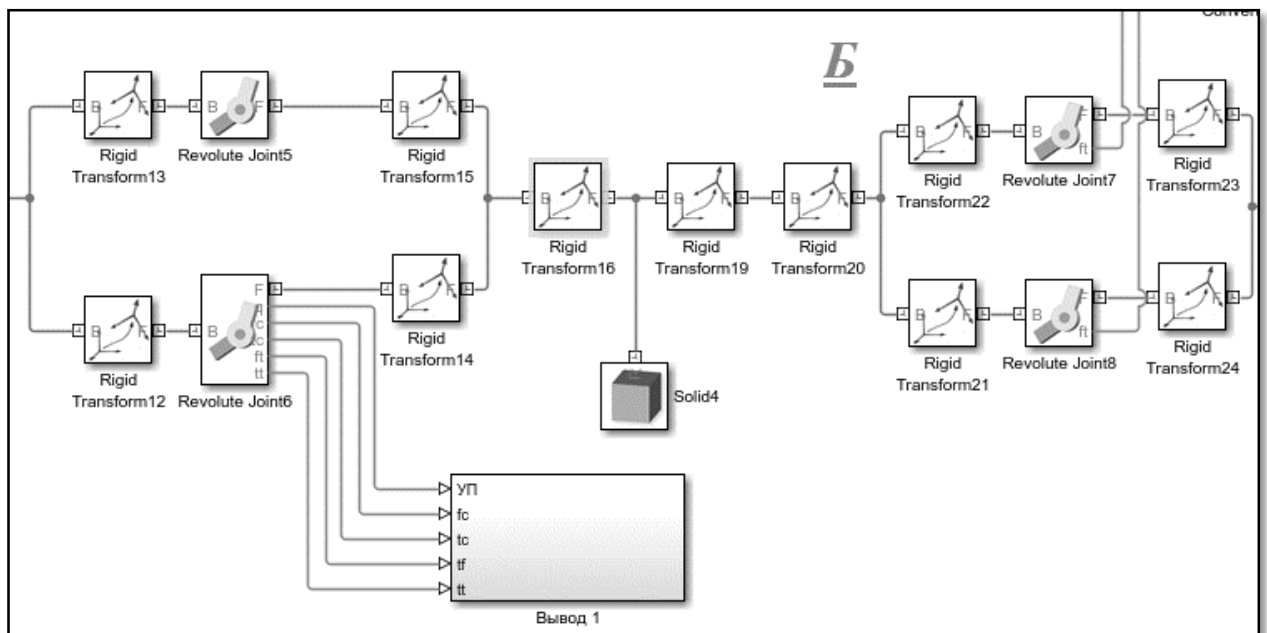


Рисунок 2.12 – Фрагмент Б из модели

Следующим этапом создания модели является разработка внутренней части механизма, о которой упоминалось ранее.

Сложность заключается в том, что точные расстояния между компонентами неизвестны, поэтому использование сочленений Revolute Joint в данном случае невозможно, так как оно предполагает задание конкретных расстояний.

Для решения данной проблемы предлагается использовать сочленение цилиндрическое сочленение, так как оно позволяет не только вращаться вокруг оси, но и перемещаться вдоль этой же оси.

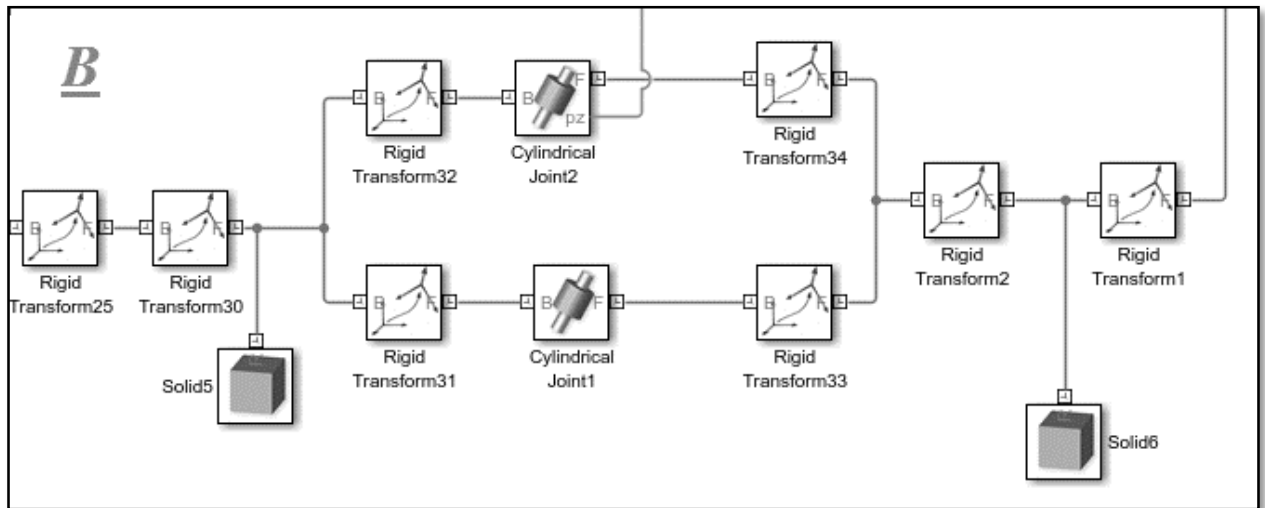


Рисунок 2.13 – Фрагмент В из модели

Также для замыкающей детали необходимо дать возможность перемещения вдоль оси и с другой стороны, для того чтобы программа могла подстроить ее положение.

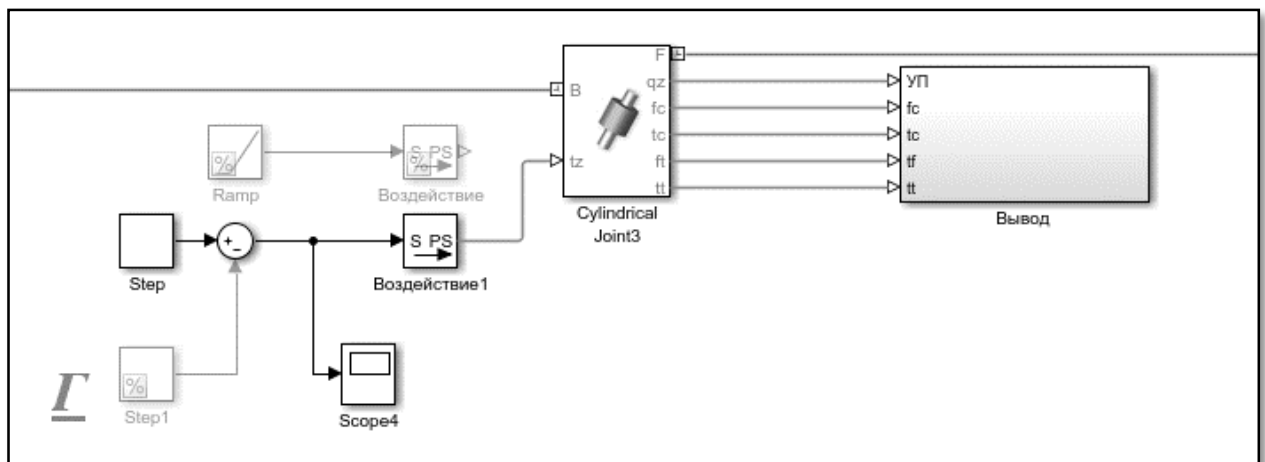


Рисунок 2.14 – Фрагмент Г из модели

Таким образом, при моделировании модели, SimMechanics переместит компоненты так, как необходимо для работоспособности модели, если это возможно.

Именно на последнее сочленение будем подавать воздействие (момент) либо задавать изменение угла поворота вала.

2.5 Исследование разработанной модели

С помощью среды моделирования SimMechanics можно провести различные исследования модели.

Как оговаривалось ранее, воздействие будем подавать на «закрывающее» сочленение, и сразу же будем смотреть на поведение данного сочленения. Также с него будем снимать различные параметры, такие как приложенный момент, общая сила, общий момент, реакцию связи и т.п.

Для того, чтобы подать момент необходимо в блоке сочленения выставить параметры согласно рисунку 2.15.

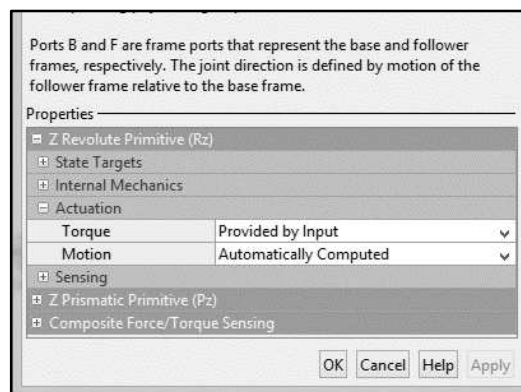


Рисунок 2.15 – Параметры для подачи момента

Момент будем задавать блоком Step, воздействия потребуются небольшие, опытным путем выяснено, что момента равного 0.0001 будет достаточно. Момент будем подавать в течении 1.5 секунды, затем снимаем его. За это время механизм разгонится до некоторой скорости, и его будет достаточно, чтобы посмотреть на поведение системы.

На рисунке 2.16 представлен график изменения угла поворота в течении времени.

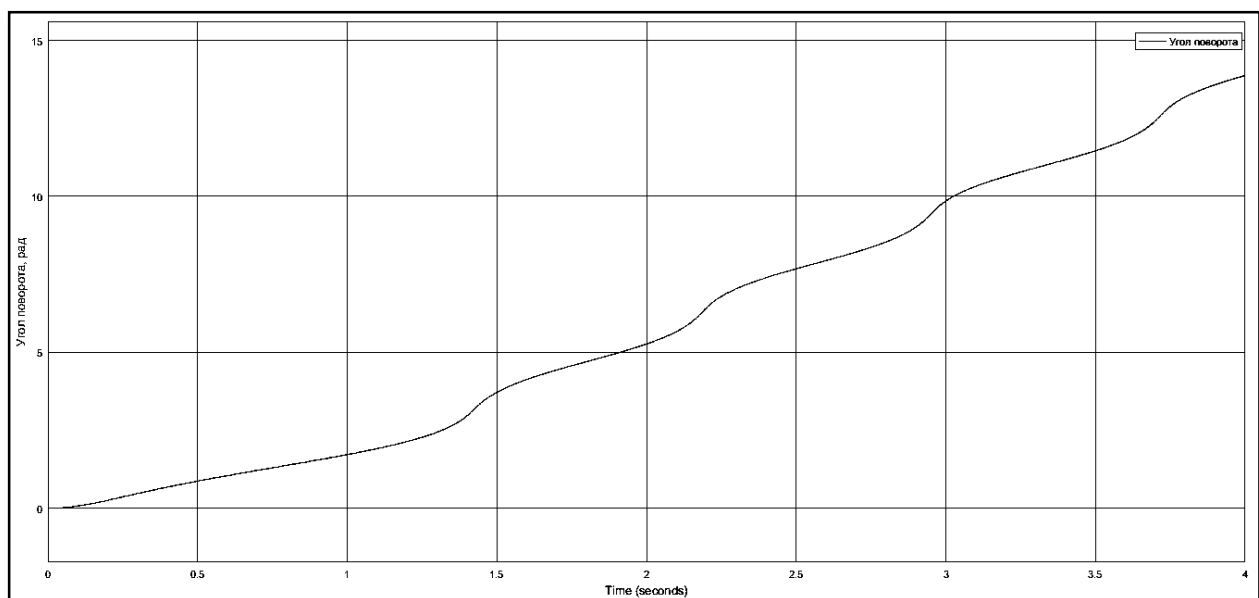


Рисунок 2.16 – График изменения угла поворота вала во времени

По рисунку 2.16 можно заметить, что график изменения угла нелинейный, это обусловлено тем, что в разных положениях, требуется различные усилия необходимые для поворота на один и то же угол. Следовательно, все звено будет носить нелинейный характер.

Также снимаем реакции связи и общие силу и момент, эти параметры нам пригодятся для выявления слабых мест сочленения. Их графики приведены ниже.

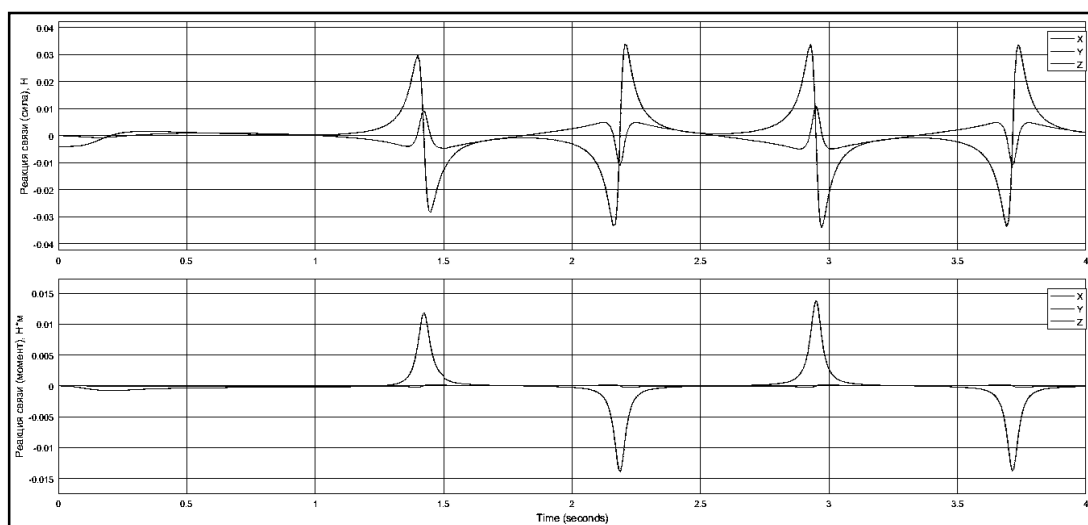


Рисунок 2.17 – Графики реакции связи

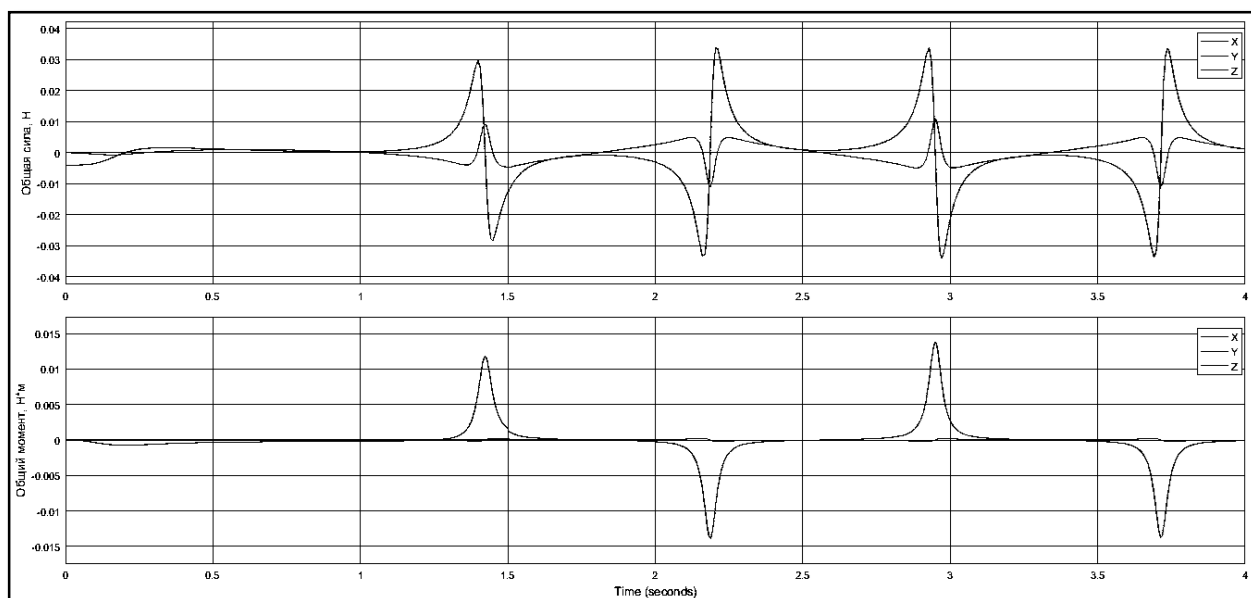


Рисунок 2.18 – Графики общей силы и момента

В каждом окне на верхнем поле изображена сила на нижнем момент. Каждое из полей включает в себя 3 графика, все три графика отображают один параметр, только спроецированный на разные оси.

Теперь посмотрим на поведение системы при задании на сочленении изменения угла. Для этого необходимо выставить параметры в блоке сочленения согласно рисунку 2.19.

Для нас большой интерес представляет графики на выходном звене механизма. Также для наглядности и выявления зависимостей между углом поворота и реакцией связи/общих сил и моментов внесем на объединим график угла поворота с другими графиками. Ниже приведены результаты этого эксперимента.

Среда моделирования SimMechanics самостоятельно не рассчитывает силы трения, их нужно задавать самому. Первый эксперимент будет проводиться без учета сил трения.

На рисунке 2.19 представлен подаваемый момент на вал.

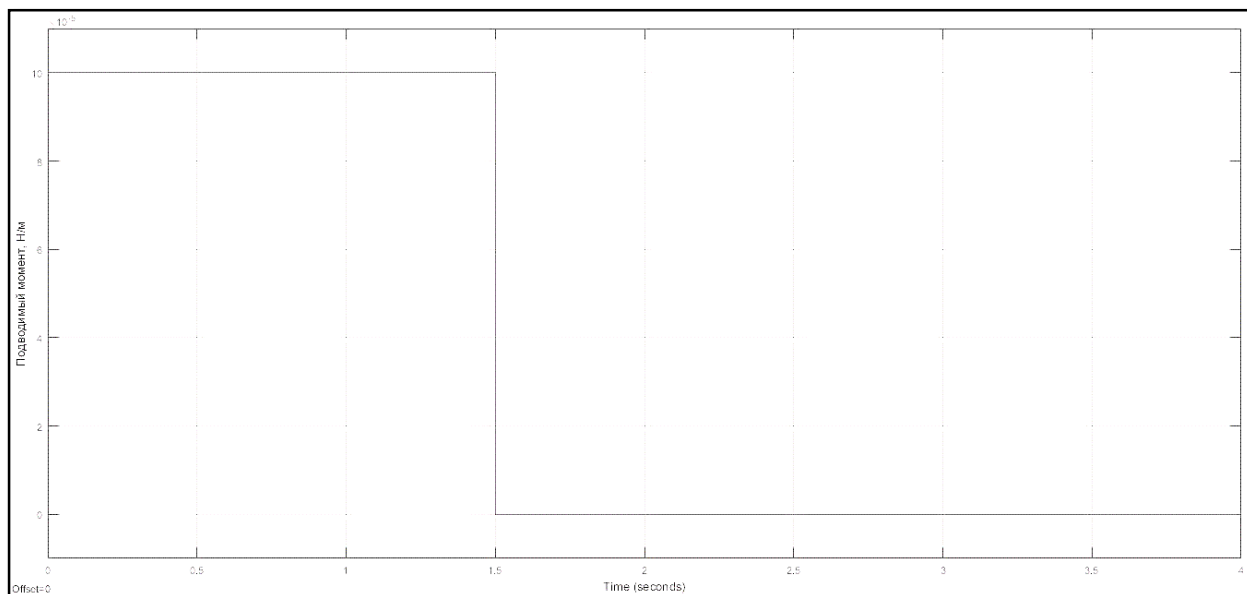


Рисунок 2.19 – Подаваемые на вал момент

Полученный на выходном звене графики сил, моментов и угла поворота представлены на рисунке 2.20 и 2.21.

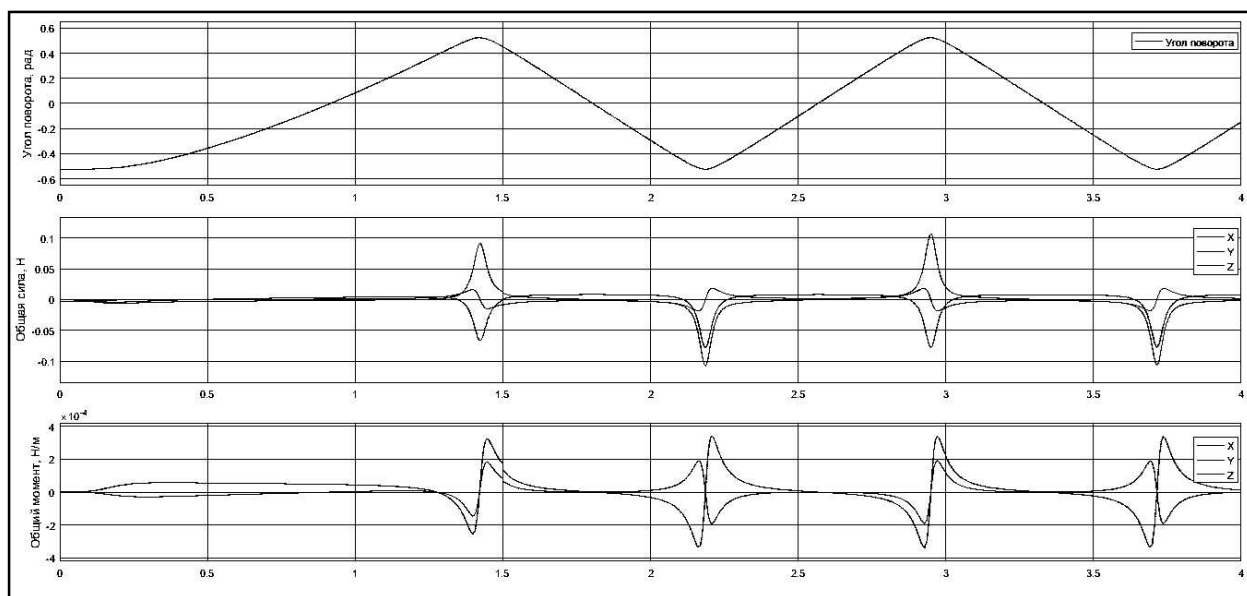


Рисунок 2.20 – Реакция связи на выходном звене

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

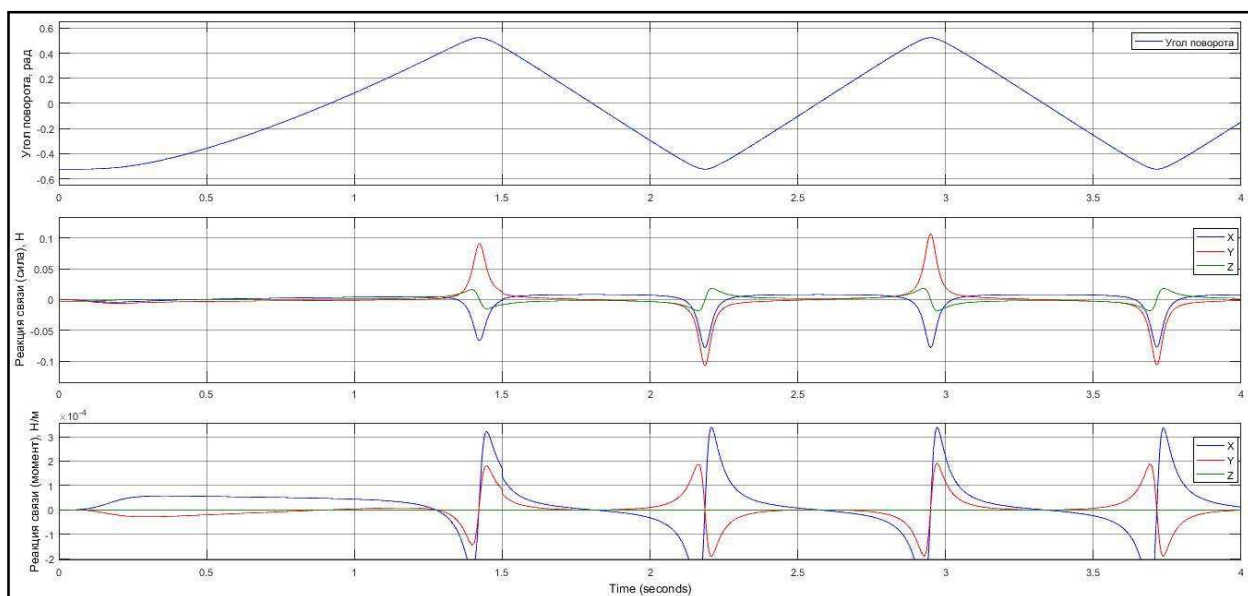


Рисунок 2.21 - Общие силы и момент на выходном звене

Из данных графиков видно, что выходное звено поворачивается на угол равный 0.52 рад, что соответствует углу поворота 30 градусов. Также хорошо видна инерционность механизма при разгоне, что уже является признаком динамической системы. Затухание, после снятия момента с сочленения проявляются слабо, происходит это из-за того, что, во-первых, в данном эксперименте, не учитывается сила трения, во-вторых из-за того, что компоненты механизма имеют небольшую массу.

Проведем второй эксперимент. Этот эксперимент будет отличаться от первого наличием приложенной силы, эквивалентной силе трения в сочленениях.

Силу трения примем равную 5% от подаваемого на входной вал момента. Поступающий на входной вал момент будет выглядеть следующим образом.

После проведения эксперимента было выяснено, что эксперимент проводимый в течении 4 секунд не позволяет оценить динамику системы. поэтому было принято решение увеличить длительность эксперимента до 20 секунд. На рисунках 2.22 – 2.24 приведены результаты эксперимента.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

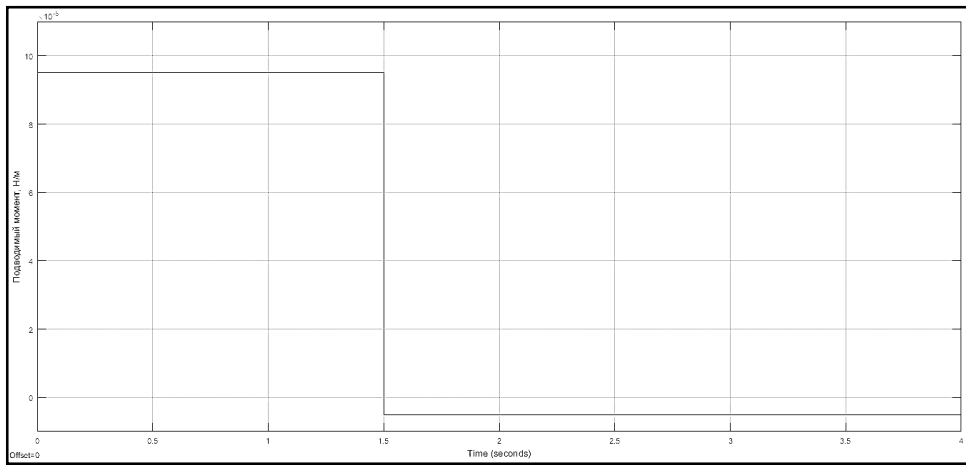


Рисунок 2.22 – Подводимый момент с моделированием силы трения

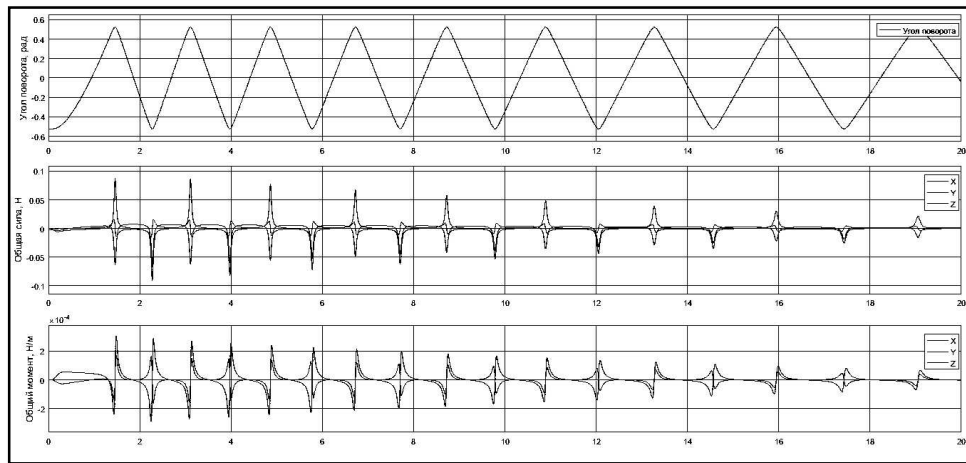


Рисунок 2.23 – Реакция связи на выходном звене с моделированием силы трения

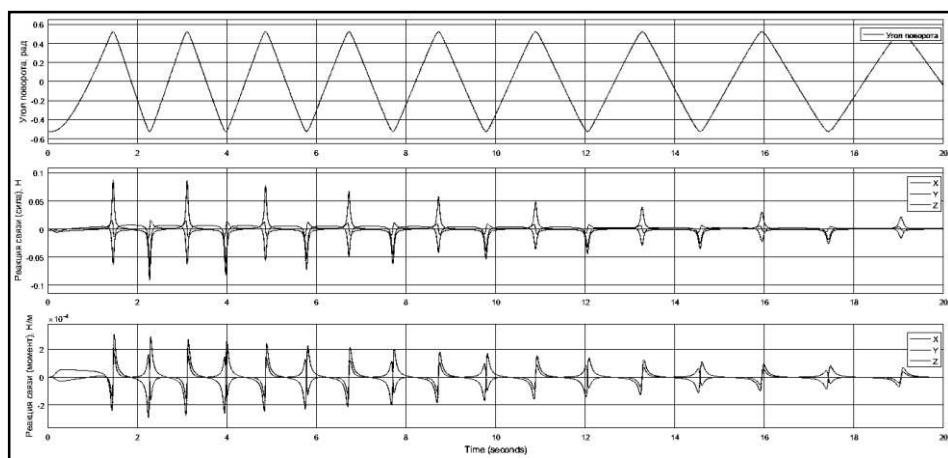


Рисунок 2.24– Общие сила и момент на выходном звене с моделированием силы трения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Для анализа результатов эксперимента, приведем график из первого эксперимента с длительностью эксперимента 20 секунд.

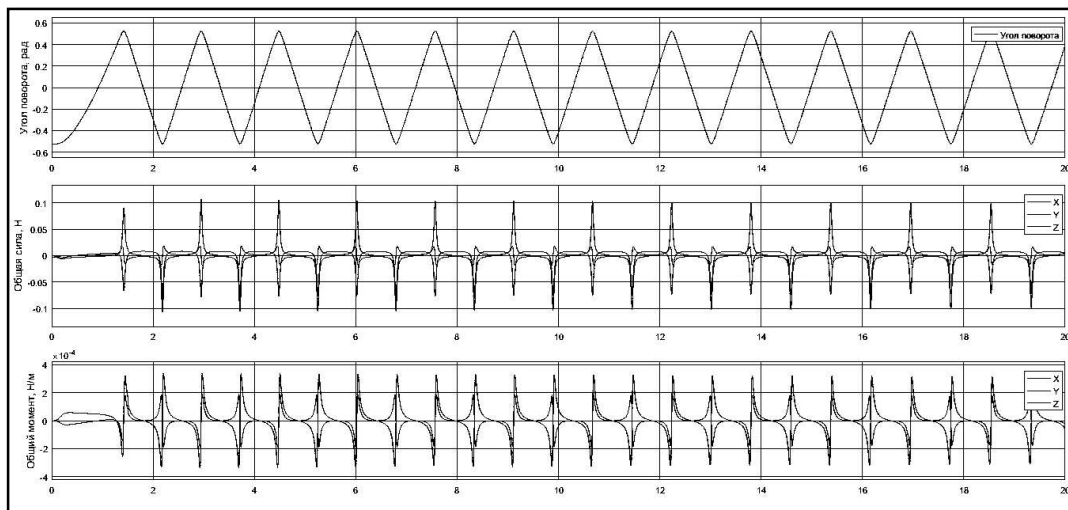


Рисунок 2.25 – Первый эксперимент длительностью 20 секунд

Из графиков, представленных на рисунках 2.23 и 2.24, можно увидеть, что период колебаний увеличивается, а это значит, что колебания постепенно затухают, следовательно, система переходит с свое состояние покоя.

Также можно увидеть, что силы и моменты в сочленениях уменьшаются по модулю.

3 Разработка проекта учебного стенда.

В данной главе описана разработка проекта учебного стенда.

3.1 Описание двигателя ДБМ120-1-0,4-2

Бесконтактные моментные электродвигатели серии ДБМ предназначены для работы в локально замкнутой (с датчиками положения ротора) или разомкнутой по углу системах регулирования и находят широкое применение в следующих областях:

быстродействующих программных или следящих системах и системах угловой стабилизации высокой точности с динамической ошибкой 1-3 угловых минуты и менее (обычно в безредукторном исполнении);

системах автоматического управления различного назначения в редукторном или безредукторном исполнении повышенной надежности и срока службы, в том числе работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации;

исполнительных системах управления роботов и манипуляторов;

приводе лентопотяжных механизмов звуко- и видеозаписывающей аппаратуры, а также устройствах внешней памяти ЭВМ и т.п.;

в медицинском приборостроении (аппаратах искусственная почка, аппаратах принудительного кровообращения, перистальтических насосах, где предъявляются повышенные требования к уровню шума, уровню пульсаций вращающего момента и т.п.);

в микробиологической, химической и пищевой промышленности для передачи вращающего момента через размещаемую в воздушном зазоре между ротором и статором герметичную перегородку в замкнутую полость с агрессивной жидкостью или в вакуум;

товарах культурно-бытового назначения (стиральные машины, кухонные комбайны и т.п.);

приводах мотор-колес электрифицированных транспортных средств, а также в качестве генераторов, например, в ветросиловых установках, для создания регулируемой нагрузки в велотренажерах и т.д.

Двигатели серии ДБМ выпускаются в двух исполнениях: с гладким (беспазовым) и пазовым статором.

Гладкий (беспазовый) статор, с двухслойной петлевой обмоткой, расположенной непосредственно в воздушном зазоре, позволяет обеспечить:

отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления и пульсаций вращающего момента, им вызываемых;

малые электромагнитные постоянные времени обмоток.

Пазовый статор с двухслойной петлевой обмоткой, уложенной в пазы сердечника, позволяет обеспечить:

- более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в двигателях с гладким статором, и соответственно более высокую статическую добротность;

- меньшую электромеханическую постоянную времени, чем у двигателей с гладким статором.

Двигатели с наружным диаметром статора 40, 63, 85, 105 и 130 мм имеют гладкий (беспазовый) статор, а двигатели с наружным диаметром статора 50, 70, 100, 120, 150 и 185 мм имеют пазовый статор.

Структура условного обозначения

ДБМXXX-XXX-XX-X:

ДБМ - двигатель бесконтактный моментный;

XXX - наружный диаметр статора, мм;

XXX - максимальный статический синхронизирующий момент двигателя базового исполнения, Н·м;

XX - частота вращения при холостом ходе (округленно), тыс.мин-1;

X - число фаз обмотки.

										Лист
										46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

МД – 15.04.06 ПЗ

Условия эксплуатации

Двигатели стойки к воздействию климатических и механических факторов, значения которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Критические значения для двигателей

Параметры климатических и механических воздействий	Значение параметров для двигателей с наружным диаметром статора, мм	
	40, 63, 85, 105, 130	50, 70, 100, 120, 150, 185
Рабочая температура окружающей среды, °С:		
повышенная, не выше	100	125
пониженная, не ниже	Минус 60	Минус 60
Предельная температура окружающей среды, °С:		
повышенная, не выше	70	85
пониженная, не ниже	Минус 60	Минус 60
Изменение температуры среды, °С	От минус 60 до 120	От минус 60 до 150
Градиент изменения температуры, °С/ч, не более	60	–
Относительная влажность при температуре 35°С, %, не более	98	98
Атмосферное рабочее давление, Па:		
повышенное, не выше	$300 \cdot 10^3$	300
пониженное, не ниже	$133 \cdot 10^{-6}$	133
Пониженное предельное давление, кПа, не ниже	12	12
Синусоидальная вибрация:		

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

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

47

Окончание таблицы 3.1		
в диапазоне частот, Гц	От 1 до 3000	От 1 до 5000
с амплитудой ускорения, м·с ⁻²	200	400
Степень жесткости	XII	XIV
Акустический шум:		
в диапазоне частот, Гц	От 50 до 10000	От 50 до 10000
при уровне звукового давления (относительно 2·10 ⁻⁵ Па), дБА, не более	160	160
Степень жесткости	IV	IV
Одиночные удары:		
с пиковым ударным ускорением, м·с ⁻²	5000	5000
при длительности действия, мс	От 0,1 до 2	От 0,1 до 2
Степень жесткости	V	V
Многократные удары:		
с пиковым ударным ускорением, м·с ⁻²	400	1500
при длительности действия, мс	От 2 до 10	От 1 до 5
Степень жесткости	II	IV
Линейное ускорение, м·с ⁻² , не более	1000	1000

Двигатели предназначены для работы во всех режимах от S1 до S8 по ГОСТ 183-74 при любых схемах включения, управления и коммутации при условии, что напряжение питания не превышает предельного значения, указанного в таблице 3.3, амплитуда импульса тока в обмотке статора не

превышает десятикратного значения тока, указанного в таблице 3, а конструкция теплоотвода обеспечивает температуру ротора и обмотки ротора, не превышающую 120°С для двигателей с наружным диаметром статора 40, 63, 85, 105 и 130 мм и 150°С для двигателей с наружным диаметром статора 50, 70, 100, 120, 150 и 185 мм.

Рабочее положение в пространстве - произвольное.

Значения превышения температуры обмотки статора, не установленного в корпусе, при соответствующих значениях потребляемого тока, в нормальных климатических условиях при включении их по схемам в соответствии с рисунком 3.1 приведены в таблице 3.2.

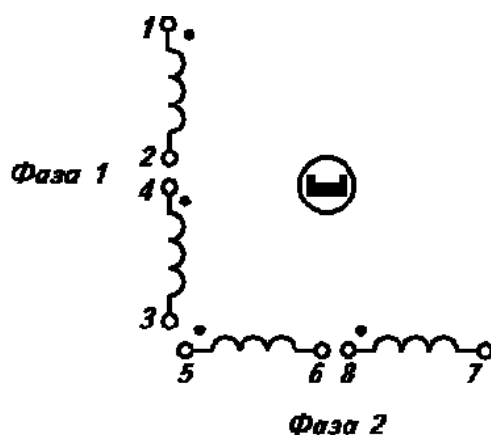


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема двухфазных двигателей серии ДБМ

Таблица 3.2 – Параметры двигателей

Исполнение	Потребляемый ток, А	Превышение температуры обмотки статора, °С, не более
ДБМ120-1-0,2-2	1,0	100
ДБМ120-1-0,4-2	2,0	
ДБМ120-1-0,8-2	4,0	

Сопrotивление изоляции электрически не связанных между собой обмоток и других токоведущих цепей относительно друг друга и корпуса составляет не менее:

100 МОм при практически холодном состоянии двигателей.

10 МОм при повышенной рабочей температуре среды или в нормальных климатических условиях при тепловом равновесии двигателей.

1 МОм при повышенной влажности воздуха и практически холодном состоянии двигателей.

В процессе воздействия факторов вида И1-И3 по ГОСТ В 20.39.404-81 время восстановления сопротивления изоляции до величины 1 МОм - не более 2 мс.

Изоляция токоведущих цепей относительно корпуса выдерживает без пробоя и перекрытия воздействие испытательного напряжения (действующее значение):

500 В для двигателей с предельным напряжением питания до 60 В включительно и 700 В для двигателей с предельным напряжением питания более 60 В в практически холодном состоянии или при тепловом равновесии двигателей.

250 В для двигателей с предельным напряжением питания до 60 В включительно и 350 В для двигателей с предельным напряжением питания более 60 В при верхнем значении относительной влажности и практически холодном состоянии двигателей.

Изоляция электрически не связанных между собой обмоток и других токоведущих цепей относительно друг друга выдерживает воздействие испытательного напряжения, составляющего 50% от вышеуказанного.

Двигатели соответствуют требованиям ГОСТ РВ 50726.0-94, ГОСТ РВ 50726.17-94.

Двигатели с наружным диаметром статора 40, 63, 85, 105 и 130 мм соответствуют требованиям ОСТ В 160.515.076-85, двигатели с наружным диаметром статора 50, 70, 100, 120, 150 и 185 мм - ОСТ В 160.515.083-86 [6].

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Выводы двигателей, включая места их присоединения, выдерживают без механических повреждений воздействие растягивающей силы, направленной вдоль оси и составляющей:

5 Н - для двигателей ДБМ40 и ДБМ63.

10 Н - для двигателей ДБМ50, ДБМ70, ДБМ85, ДБМ100, ДБМ105, ДБМ120 и ДБМ130.

20 Н - для двигателей ДБМ150 и ДБМ185.

Эксплуатацию двигателей следует проводить в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации.

3.2 Выбор датчика положения

Рассмотрим несколько видов датчиков положения:

Резольвер — это электрический трансформатор, используемый для измерения угла поворота. Большинство резольверов похожи на электрические двигатели: у них медная обмотка на статоре и приточенный металлический ротор. Индуктивная связь между обмотками трансформатора изменяется в зависимости от угла. Таким образом, если отправить на резольвер сигнал переменного тока и измерить выходной сигнал на обмотках трансформатора, в результате будет получен сигнал переменного тока, амплитуда которого пропорциональна углу.

Преимущества – Надежность, прочность, точность, долговечность.

Недостатки – Большой размер и вес, высокая цена, необходимость специальных навыков и знаний для выбора и внедрения, необходимость дополнительных преобразователей.

Энкодер - вращающийся датчик положения, также называемый датчиком положения вала, представляет собой устройство, преобразующее угловое положение или движение в аналоговый или цифровой код. Существует два типа таких датчиков: абсолютные и инкрементальные (относительные). Выходные данные абсолютных энкодеров позволяют определить текущее положение вала,

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

На кафедре имеется абсолютный энкодер ППК-15, имеющий 4 бита на количество оборотов вала и 11 бит на кодирование положения внутри оборота.

В конструкции нашего привода мы применим передачу 1 к 8, следовательно, мы имеем абсолютное положение вала в кодированное в 4 бита и 11 бит, для кодирования положения в пределах одного электрического оборота. В таком случае один старший бит отбросится, для того чтобы его не отбрасывать - придется использовать передачу 1 к 16, а это уже не позволяет выполнить одну из поставленных нами задач, а именно спроектировать компактную конструкцию привода.

3.3 Описание абсолютного энкодера

В большинстве случаев датчики положения и перемещения являются элементами цифровых систем управления, что требует преобразования выходного сигнала в цифровую форму. Именно такой сигнал формируется в кодовом оптическом датчике положения и перемещения (кодовом ОДП, или энкодере). Кодированная шкала кодового ОДП представляет собой стеклянное основание с кодовой маской, выполненной в виде нескольких (обычно до 20) дорожек с прозрачными и непрозрачными сегментами. Число дорожек, как правило, определяет разрядность выходного двоичного кода. Осветитель (инфракрасные светодиоды) создает лучистый поток, падающий на шкалу. В момент съема информации луч, проходя через прозрачные сегменты кодовых дорожек шкалы и ограничивающую защитную диафрагму, освещает фотоприемники (фотодиодные матрицы), усиленные сигналы с которых принимаются за двоичные единицы (рис. 3.1). Отсутствие сигнала с фотоприемника соответствует двоичному нулю. В результате каждому перемещению соответствует определенная комбинация двоичных единиц и нулей, являющаяся его цифровым кодом. Для углового энкодера разрешение шкалы составляет $2\pi / 2^n$, следовательно, разрешающая способность датчика

устранения неоднозначности считывания применяют специальные методы считывания и специальные коды. Так, при использовании циклического кода Грея, ошибка считывания не превышает младшего значащего разряда независимо от того, в каком из разрядов она произошла [9].

Таблица 4 - Таблица перевода десятичных чисел из двоичного кода в код Грея

Десятичное число	Двоичный код	Код Грея	Десятичное число	Двоичный код	Код Грея
0	00000	00000	9	01001	01101
1	00001	00001	10	01010	01111
2	00010	00011	11	01011	01110
3	00011	00010	12	01100	01010
4	00100	00110	13	01101	01011
5	00101	00111	14	01110	01001
6	00110	00101	15	01111	01000
7	00111	00100	16	10000	11000
8	01000	01100			

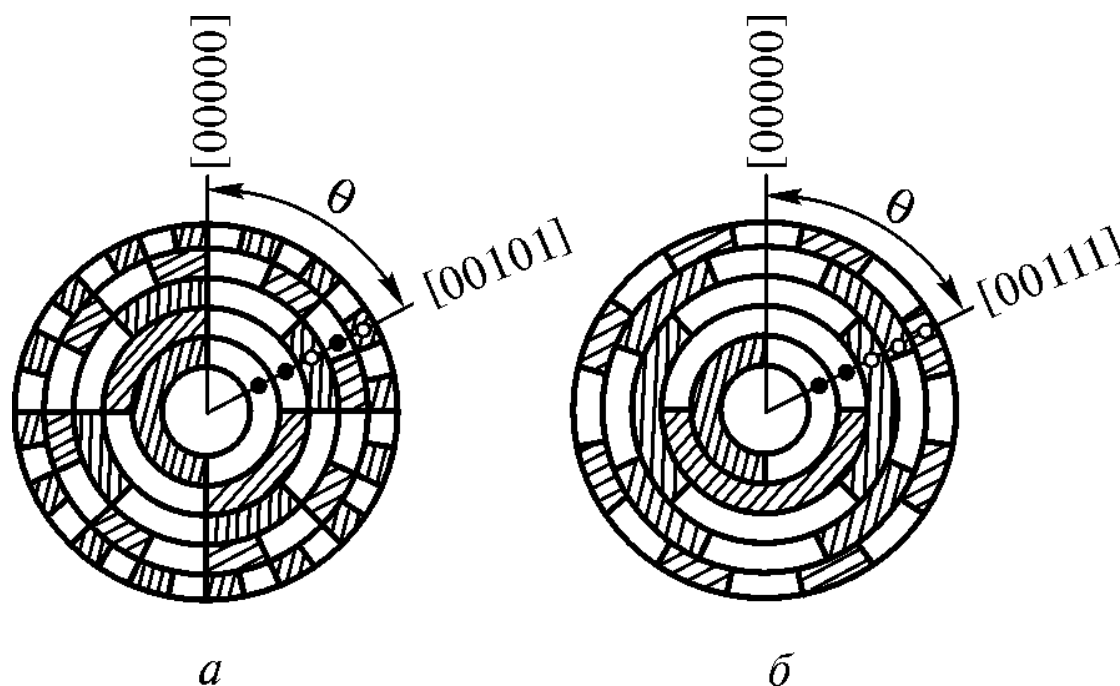


Рисунок 3.2. Кодированный диск для двоичного кода (а) и для кода Грея (б)

3.4 Обзор разработанной конструкции привода

Общий вид разработанного стенда представлен на рисунке 3.3.

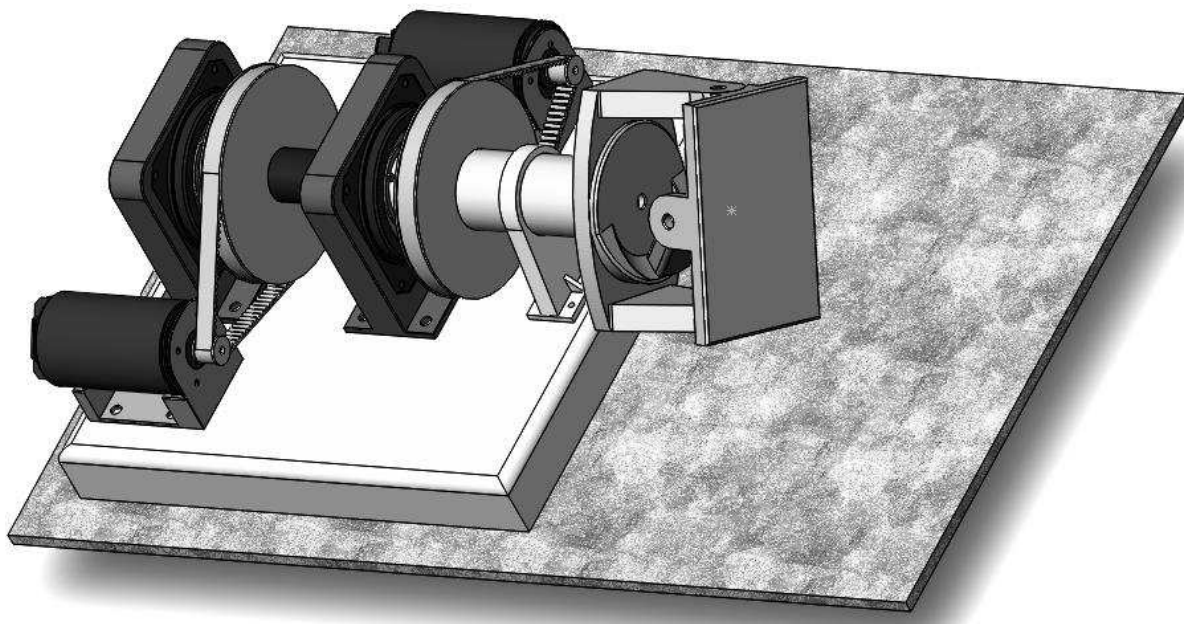


Рисунок 3.3 – Общий вид станда

В первую очередь для станда были созданы 3D-модели уже имеющегося оборудования, а именно двигателя ДБМ-120-1-0,4-2, состоящего из статора (рисунок 3.4) и ротора (рисунок 3.5), и абсолютного энкодера ППК-15 (рисунок 3.6). Размеры для построения 3D-моделей были сняты непосредственно с имеющегося оборудования.



Рисунок 3.4 – 3D-модель статора двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

56



Рисунок 3.5 – 3D-модель ротора двигателя



Рисунок 3.6 – 3D-модель энкодера ППК-15

Вся конструкция располагается на специальной платформе, на которой уже размечены места крепления элементов, и к которой уже крепится все оборудование. Платформа представлена на рисунке 3.7.

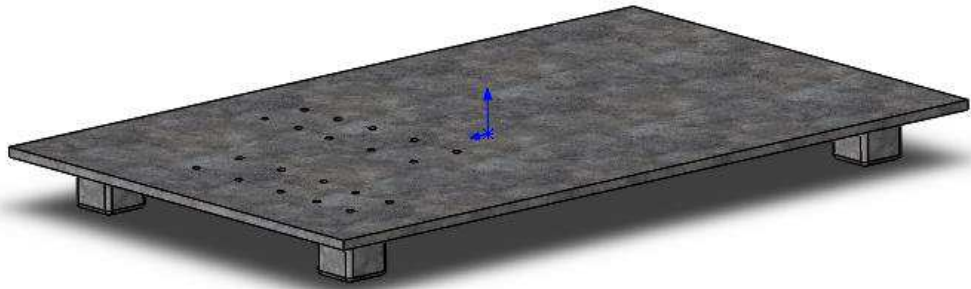


Рисунок 3.7 – Платформа для сборки

Также разработаны конструкции для крепления основного оборудования на стенд. Крепления для двигателя представлено на рисунках 3.8-3.10, а крепление для энкодера на рисунках 3.11, 3.12.



Рисунок 3.8 – Крепление для двигателя (вид 1)

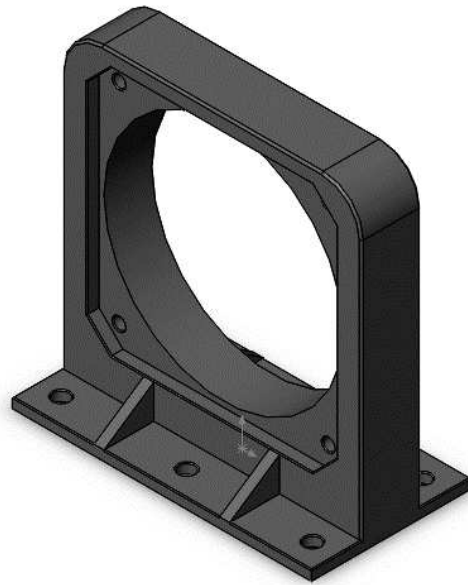


Рисунок 3.9 – Крепление для двигателя (вид 2)

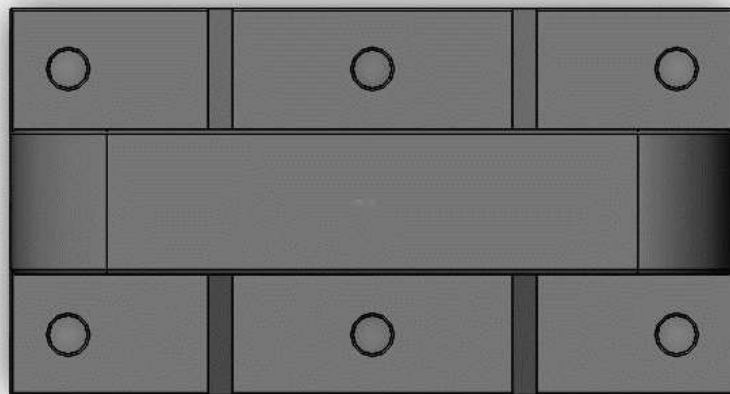


Рисунок 3.10 – Крепление для двигателя (вид сверху)

Конструкция сделана таким образом, что оси роторов имеют одну ось, следовательно, вал размещен соосно с другим валом и фактически расположен внутри него (полого вала). Ременная передача выполнена в соотношении 1:8, для того чтобы выполнить требование, описанное выше.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

59

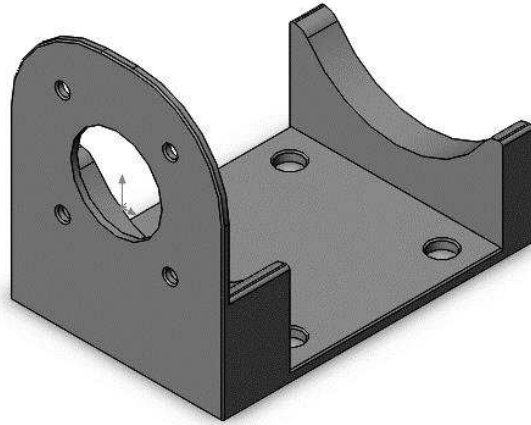


Рисунок 3.11 – Крепление для энкодера ППК-15 (вид 1)

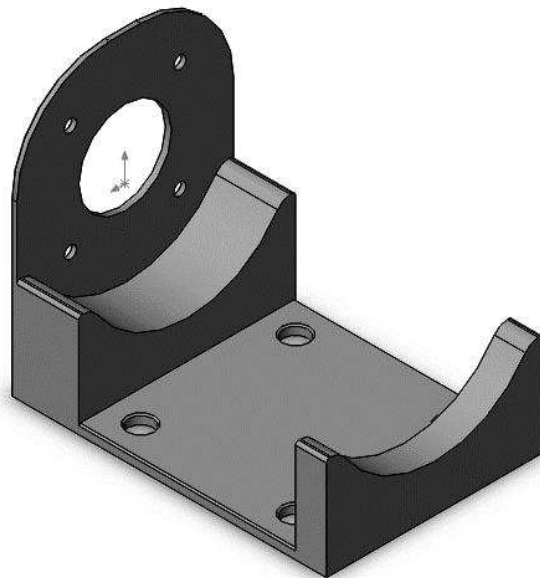


Рисунок 3.12 – Крепление для энкодера ППК-15 (вид 2)

4 Разработка структуры системы управления

Изначально для управления механизмом рассматривалось два варианта управления:

- управление по скорости;
- управление по положению.

Было решено сделать управление по положению.

4.1 Прямая задача двухкоординатного дефлектора

Решение прямой задачи однокоординатного дефлектора описано в пункте 2.3. в данном пункте мы рассмотрим решение прямой задачи двухкоординатного дефлектора.

На рисунке 4.1 изображена кинематическая схема двухкоординатного дефлектора.

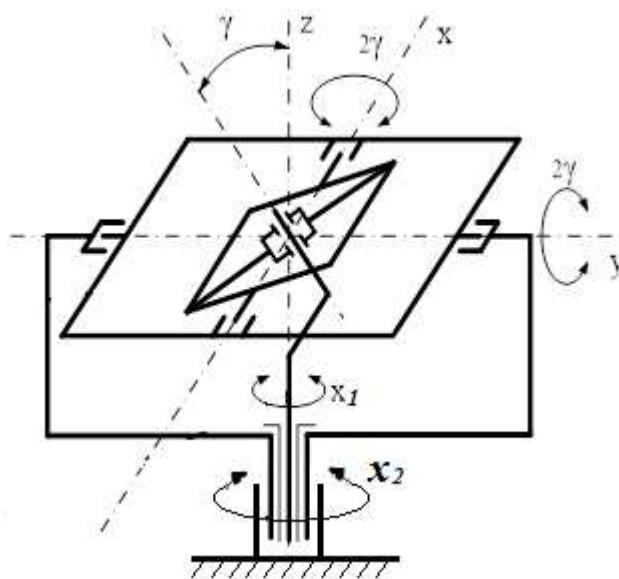


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема двухкоординатного дефлектора

В сравнении с однокоординатным дефлектором добавилась еще одна ось вращения. Угол поворота обозначим через x_2 .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Поворот по данной оси будет влиять на выходные углы механизма. Поэтому необходимо решить задачу для двухкоординатного дефлектора.

Для наглядности сделаем схематичное представление данного механизма. На рисунке 4.2 представлена схематичное изображение.

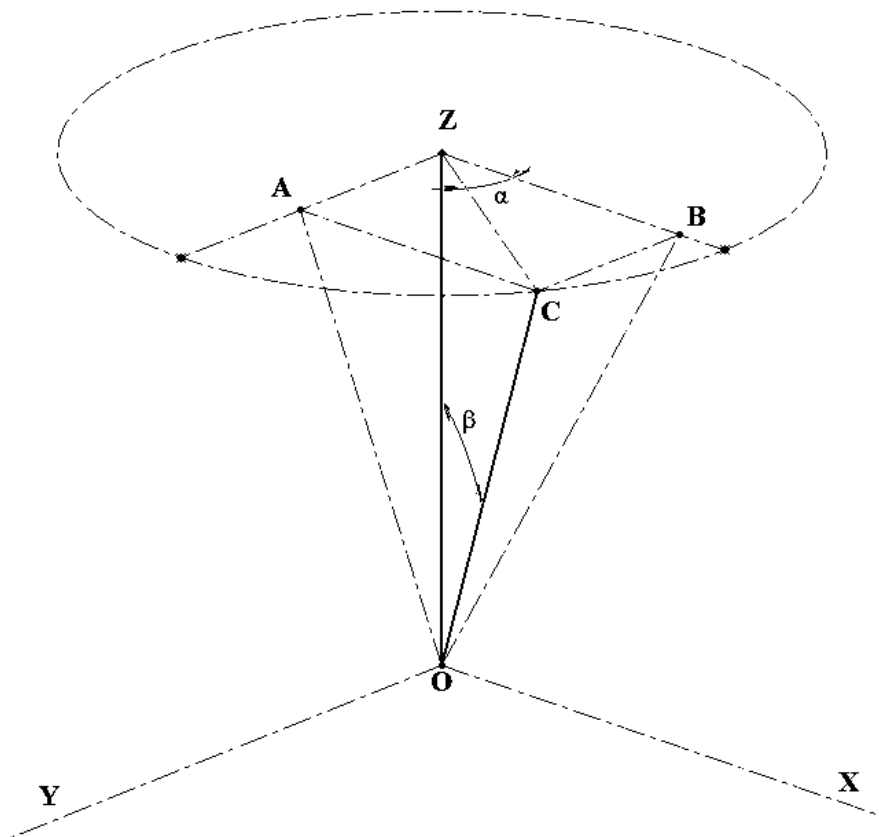


Рисунок 4.2 – Схематичное представление направления двухкоординатного дефлектора

Сторона OC физически является нормалью, проведенной к выходному звену, следовательно, угол β отражает наклон выходного звена. Сделаем проекции на плоскости XOZ и YOZ . Нам необходимо найти углы между проекциями и осью Z , это и будет являться решением поставленной задачи. Обозначим через u_x – проекция угла β на плоскость ZOX и u_y – проекцию угла β на плоскость ZOY .

Входные углы на рисунке обозначены α и β .

Рассмотрим треугольник ZOC .

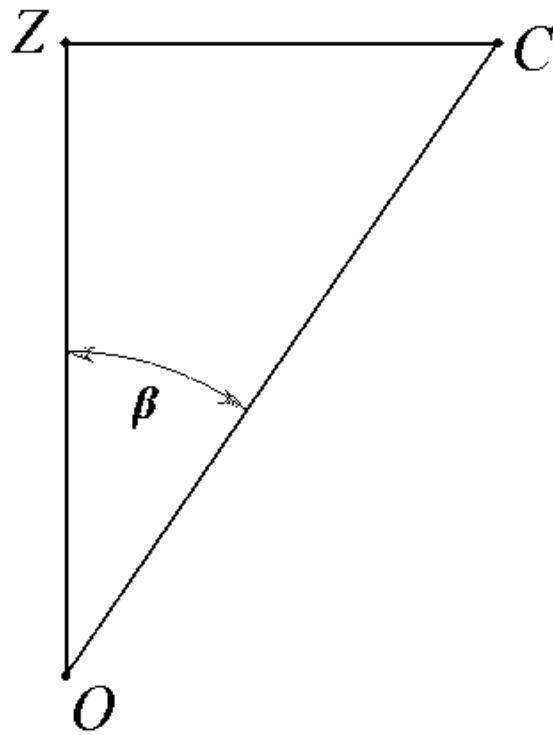


Рисунок 4.3 – Рассматриваемый треугольник ZOC

Это прямоугольный треугольник. Выразим катет CZ через угол и гипотенузу:

$$CZ = OC \cdot \sin(\beta) \quad (4.2)$$

Катет OZ выразим через два других катета, так как нам они уже известны, по теореме Пифагора:

$$OZ = \sqrt{OC^2 - CZ^2} \quad (4.3)$$

Далее рассмотрим треугольник со сторонами ZCB .

Как можно заметить, катет $AZ = BC$.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

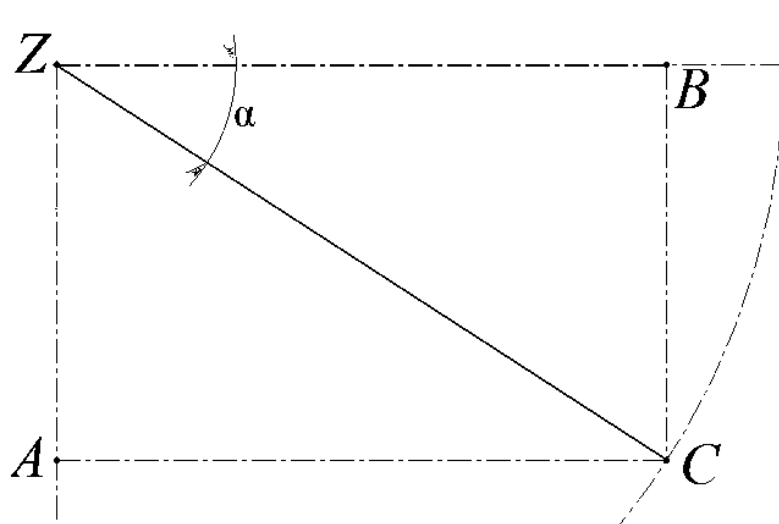


Рисунок 4.4 –Треугольники ZCB и ZCA

Это также прямоугольный треугольник. В данном треугольнике выразим катеты BZ и BC через гипотенузу и угол α .

$$\begin{aligned} BZ &= CZ \cdot \cos(\alpha) \\ BC &= CZ \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \tag{4.4}$$

В выражения (4.4) подставим CZ :

$$\begin{aligned} BZ &= OC \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \\ BC &= OC \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \tag{4.5}$$

В выражение (4.3) также подставим выражение (4.2), получим:

$$OZ = \sqrt{OC^2 - (OC \cdot \sin(\beta))^2} \tag{4.6}$$

Проведем упрощения:

$$OZ = \sqrt{OC^2 - OC^2 \cdot \sin^2(\beta)} \tag{4.4}$$

$$OZ = \sqrt{OC^2 \cdot (1 - \sin^2(\beta))} \quad (4.8)$$

$$OZ = OC \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\beta)} \quad (4.9)$$

Так как $\sqrt{1 - \sin^2(\beta)} = \cos(\beta)$, то получим:

$$OZ = OC \cdot \cos(\beta) \quad (4.10)$$

Рассмотрим треугольник **ZOB**.

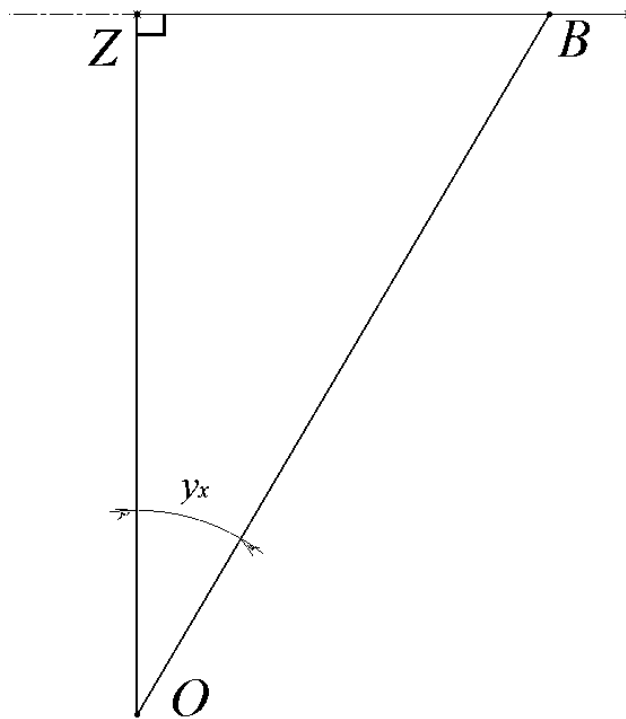


Рисунок 4.5 – Рассматриваемый треугольник ZOB

Нам необходимо найти угол y_x . Так как нам известны катеты **OZ** и **BZ**, то через них выразим угол:

$$\tan(y_x) = \frac{BZ}{OZ} = \frac{OC \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha)}{OC \cdot \cos(\beta)} \quad (4.11)$$

Проведем упрощения:

$$\tan(y_x) = \tan(\beta) \cdot \cos(\alpha) \quad (4.12)$$

$$y_x = \arctan(\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha)) \quad (4.13)$$

Теперь рассмотрим треугольник ZOA .

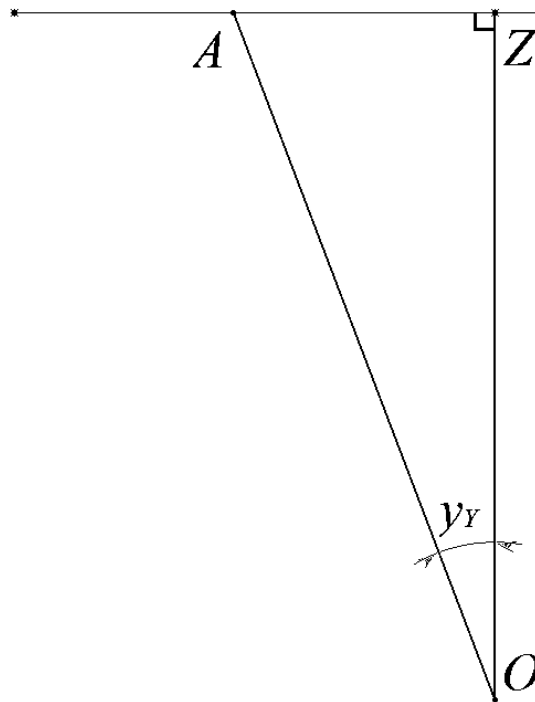


Рисунок 4.6 – Рассматриваемый треугольник

Данный треугольник также является прямоугольным. Тут ситуация аналогична предыдущей, и требует таких же упрощений.

$$\tan(y_y) = \frac{AZ}{OZ} = \frac{OC \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha)}{OC \cdot \cos(\beta)} \quad (4.14)$$

$$\tan(y_y) = \tan(\beta) \cdot \sin(\alpha) \quad (4.15)$$

$$y_y = \arctan(\tan(\beta) \cdot \sin(\alpha)) \quad (4.16)$$

Подведем итог, решение прямой задачи двухкоординатного дефлектора представляет собой выражения (4.13) и (4.16) и выглядит следующим образом:

$$y_x = \arctan(\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha))$$

$$y_y = \arctan(\tan(\beta) \cdot \sin(\alpha))$$

4.2 Исследование адекватности динамической модели

Проведем следующий эксперимент, возьмем случайные входные углы и сначала вычислим аналитически значения выходных углов, затем те же самые входные углы подставим в модель SimMechanics и посмотрим на значения выходных углов в модели. Таким образом, мы проверим корректно поведение модели, разработанная в SimMechanics.

Возьмем случайные углы, например:

$$\alpha = 67 \text{ градусов};$$

$$\beta = 25 \text{ градусов}.$$

Вычислим выходные углы, подставив значения входные углов в уравнения (4.13) и (4.16):

Получим:

$$y_x = 10.33^\circ$$

$$y_y = 23.23^\circ$$

Теперь подставим те же входные значения в модель и посмотрим, какие значения нам вычислит SimMechanics.

Так как SimMechanics для вычислений использует радианы, то нужно градусы перевести в радианы, сделать это можно следующим способом: значение, которое мы подаем на сочленения, в блоке step умножить на $\pi/180$, таким образом, выполнив преобразование градусов в радианы.

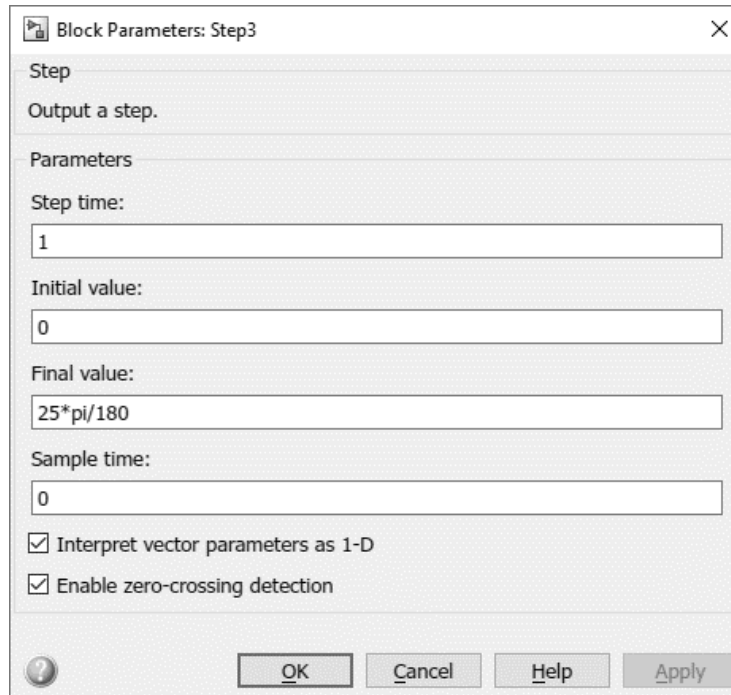


Рисунок 4.7 – Параметры блока Step

Для вывода значений также нужно будет сделать преобразование радиан в градусы как показано на рисунке 4.8.

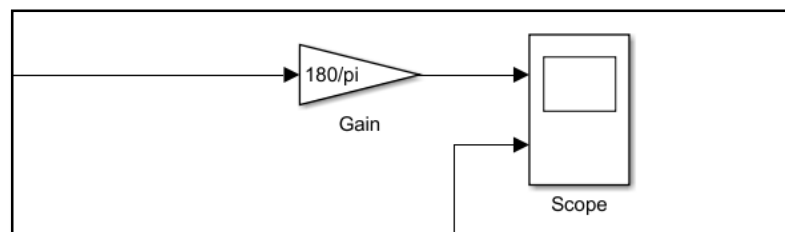


Рисунок 4.8 – Преобразование радиан в градусы

Так как модель собрана так, что угол наклона составляет $36,87^\circ$, то графики будут выглядеть следующим образом:

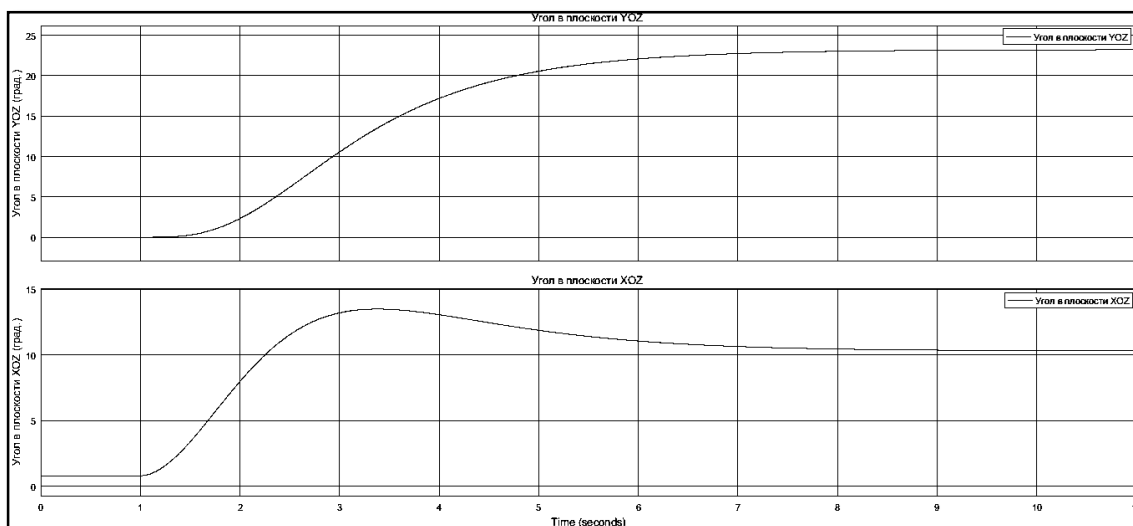


Рисунок 4.9– Графики выходных углов

На первом графике изображён угол u_x , на втором – u_y .

Таким образом берем установившееся значение после переходного процесса и сравниваем его с вычисленным аналитически ранее. Они совпадают. Следовательно, можно сделать вывод, что модель адекватно отражает поведение самого механизма.

4.3 Обратная задача двухкоординатного дефлектора

Также будем рассматривать схематичное представление дефлектора. Общая схема механизма представлена на рисунке 4.10.

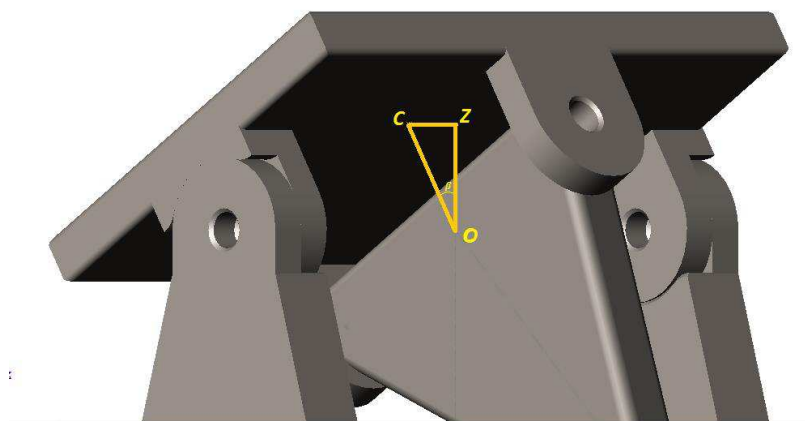


Рисунок 4.11 – Расположение исследуемой зоны

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

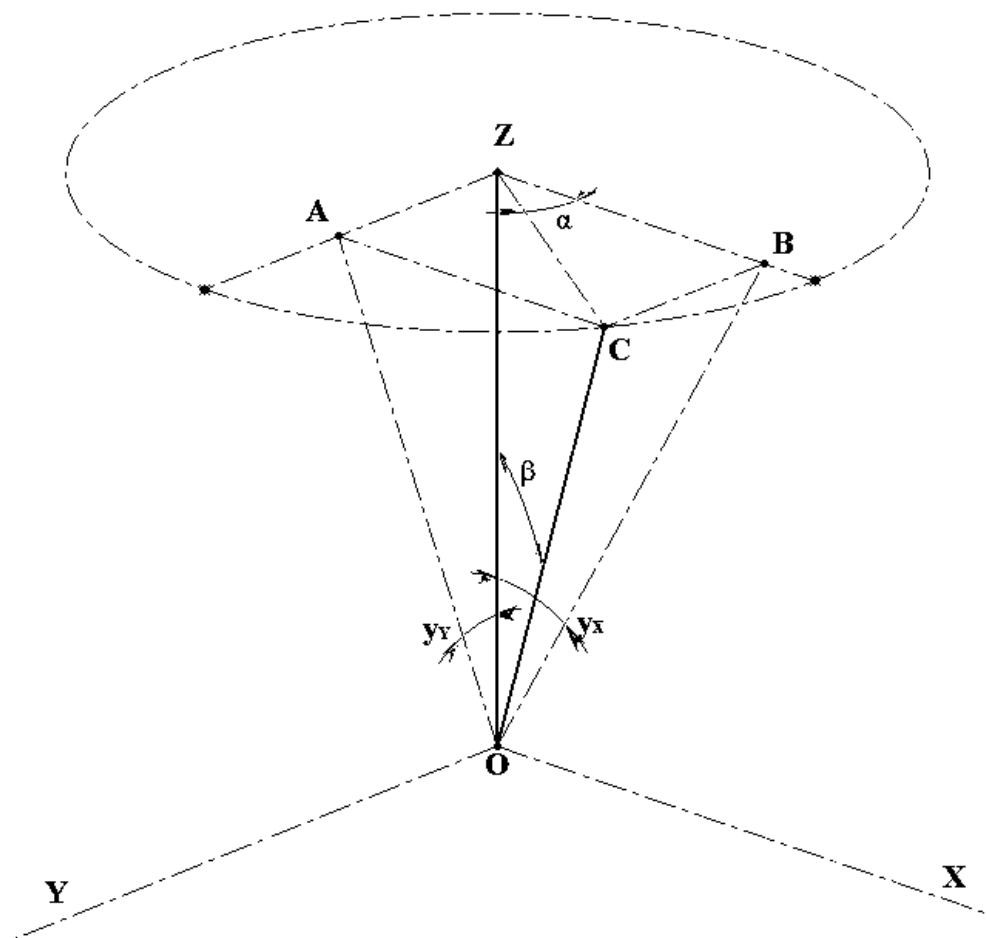


Рисунок 4.10 – Общая схема дефлектора

В начальных условиях нам известны выходные углы:

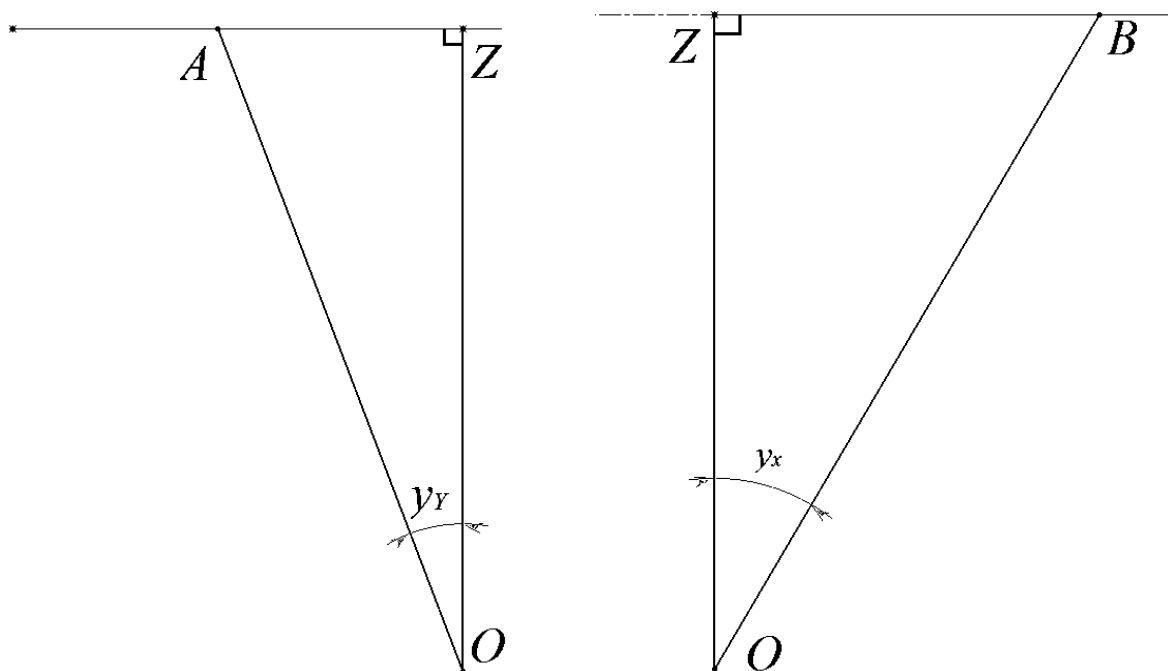
u_x - проекция угла β на плоскость XOZ

u_y - проекция угла β на плоскость YOZ

Нам необходимо найти углы входные углы α и β .

Для начала рассмотрим треугольники BOZ и AOZ .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



а) – треугольник AOZ; б) – треугольник BOZ

Рисунок 4.11 – Рассматриваемые треугольники

Оба треугольника являются прямоугольными. Выразим катеты BZ и AZ через общую сторону OZ :

$$BZ = \tan(y_X) \cdot OZ \quad (4.17)$$

$$AZ = \tan(y_Y) \cdot OZ \quad (4.18)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник BZC .

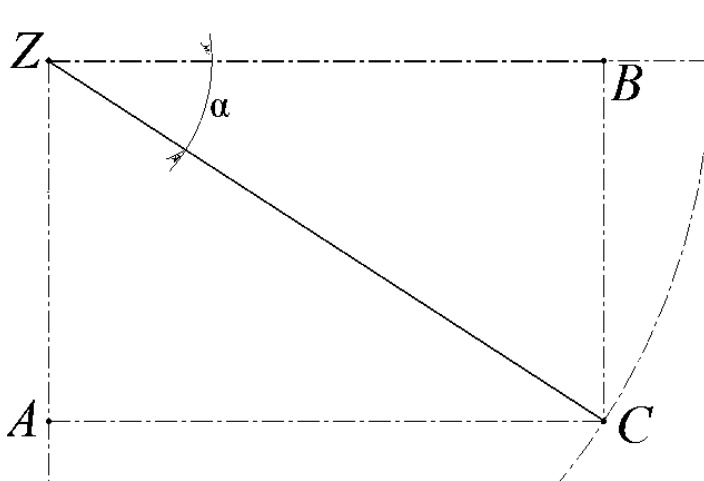


Рисунок 4.12 – Рассматриваемый треугольник BZC

В данном случае сторона AZ равна BC . Найдем угол выразим $\tan(\alpha)$.

$$\tan(\alpha) = \frac{AZ}{BZ} = \frac{\tan(y_Y) \cdot OZ}{\tan(y_X) \cdot OZ} \quad (4.19)$$

Выразим α и проведем упрощения и получим первое уравнение:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan(y_Y)}{\tan(y_X)}\right) \quad (4.20)$$

Уравнение для нахождения одного из углов найдено, теперь найдем уравнение для нахождения второго угла, для этого в треугольниках BZC и ZOB выразим катеты BC и OZ соответственно, через общую сторону BZ :

$$\cos(\alpha) = \frac{BZ}{ZC} \quad (4.21)$$

Следовательно,

$$ZC = \frac{BZ}{\cos(\alpha)} \quad (4.22)$$

Выразим OZ :

$$\tan(y_X) = \frac{BZ}{OZ} \quad (2.23)$$

$$OZ = \frac{BZ}{\tan(y_X)} \quad (4.24)$$

Далее рассмотрим треугольник ZOC .

И выразим из этого треугольника угол β через катеты ZC и OZ с помощью тангенса.

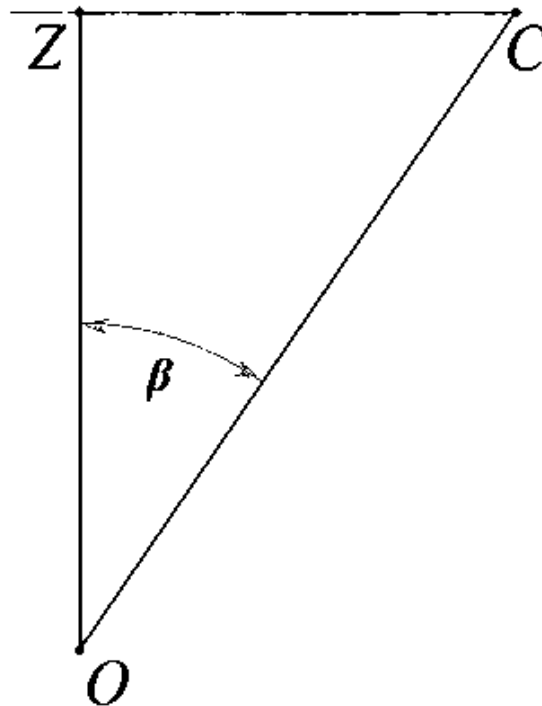


Рисунок 4.13 – Рассматриваемый треугольник

Таким образом:

$$\tan(\beta) = \frac{ZC}{OZ} = \frac{\frac{BZ}{\cos(\alpha)}}{\frac{AZ}{\tan(y_x)}} \quad (4.25)$$

Проведем упрощения и получим:

$$\tan(\beta) = \frac{\tan(y_x)}{\cos(\alpha)} \quad (4.26)$$

И из этого выразим непосредственно β .

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan(y_X)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (4.27)$$

Это второе уравнение в решении нашей задачи.

Таким образом решение обратной задачи выглядит следующим образом:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan(y_Y)}{\tan(y_X)}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan(y_X)}{\cos(\alpha)}\right)$$

4.4 Модернизация динамической модели объекта

Представленная ранее динамическая модель объекта, требует модернизации, в первую очередь это обусловлено тем, что она сложна для восприятия, это можно решить путем объединения блоков в группы (подсистемы), этим мы упростим первоначальный вид модели. Также модель требует определенных преобразований для внедрения в нее системы управления.

Преобразованная схема модели представлена на рисунках 4.14 и 4.15. Так как модель получается длинной, и это усложняет ее чтение, было решено разделить модель на две части.

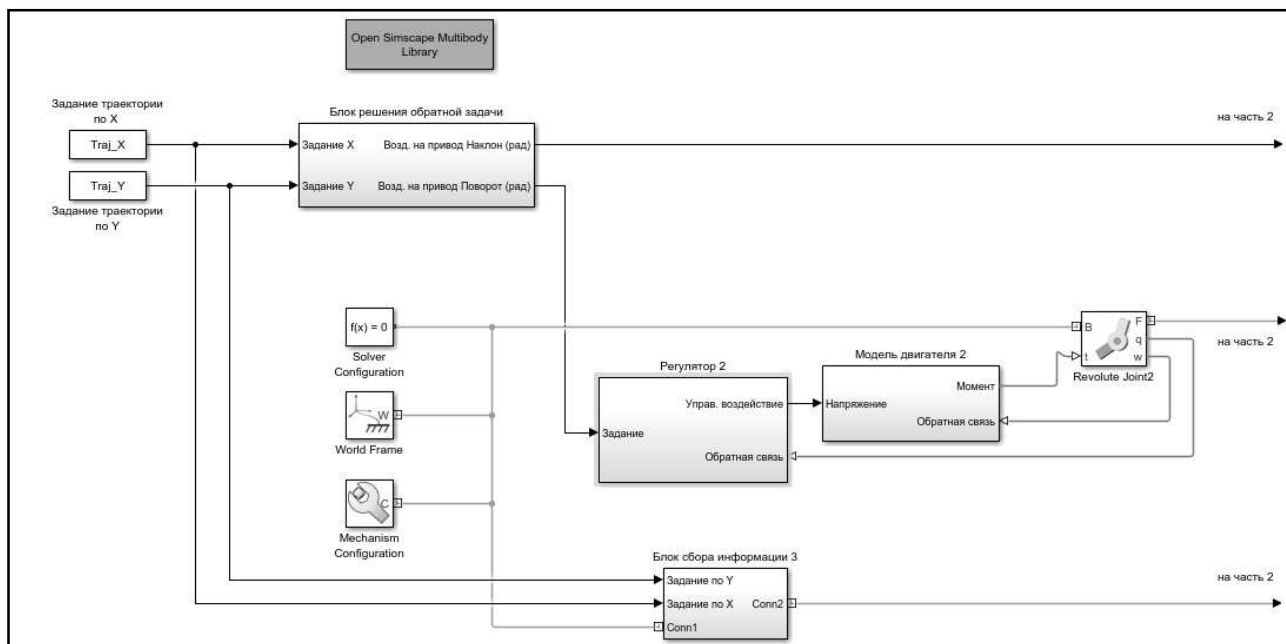


Рисунок 4.14 – Модернизированная модель (часть 1)

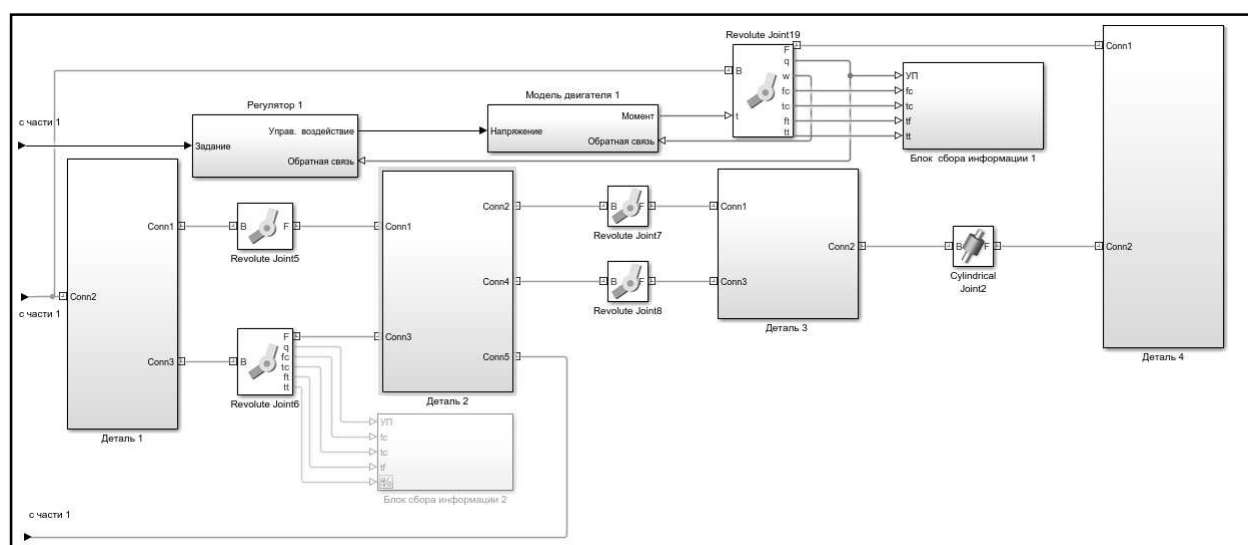


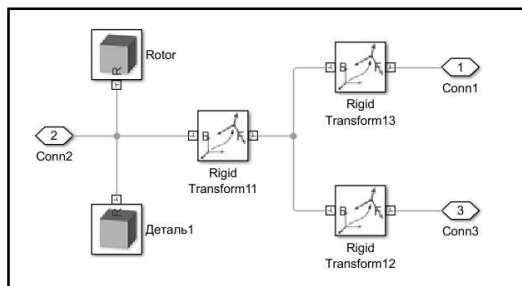
Рисунок 4.15 – Модернизированная модель (часть 2)

Из приведенных рисунков можно заметить, что в модель добавились блок решения обратной задачи, регуляторы и модели двигателей, подробное добавления данных блоков будет рассмотрено позже.

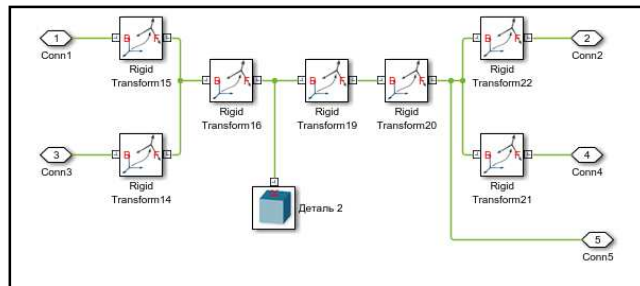
В данном пункте рассмотрим подсистемы «Деталь 1» (рисунок 4.16а), «Деталь 2» (рисунок 4.16б), «Деталь 3» (рисунок 4.16в) и «Деталь 4» (рисунок 4.16г), а также «Блок сбора информации 3».

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

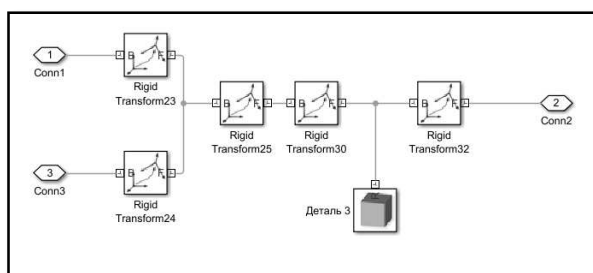
Подсистема Деталь 1-4 содержат в себе функциональные блоки, связанные с интеграцией в модель 3D-моделей механизма и также перемещением системы координат в необходимое место.



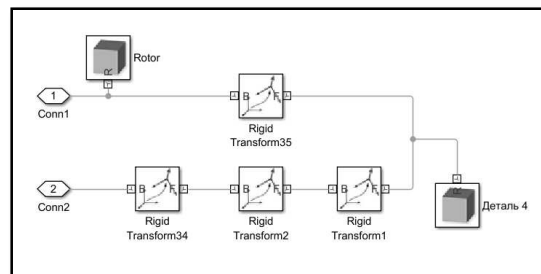
а) блок деталь 1;



б) блок деталь 2;



в) – блок деталь 3;



г) блок деталь 4;

Рисунок 4.16 – Основные подсистемы модели

Первое на что стоит обратить внимание, это соединение на рисунок 4.16б, а именно Conn5 – данный выход соединяется с Блоком сбора данных 3. Правильное подключение данного соединения необходимо для верного снятия углов в плоскостях XOZ и YOZ.

Второе – это блоки Rotor на рисунках 4.16а и 4.16г. Данный блок учитывает инерцию ротора двигателя, что актуально при интеграции комбинированной модели двигателя в динамическую модель механизма.

Блок сбора информации 3 используется для съема углов u_x и u_y . Содержимое данной подсистемы представлено на рисунке 4.17.

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

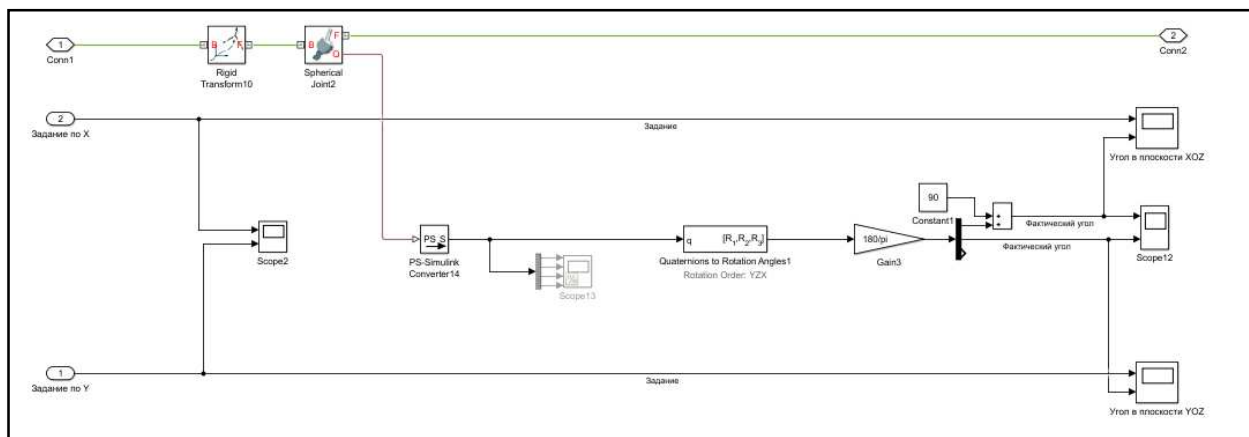


Рисунок 4.17 – Блок сбора информации 3

Углы u_x и u_y снимаются относительно неподвижной системы координат, и представляют собой проекции угла β на плоскости XOZ и YOZ.

Снятие углов было реализовано через сферическое сочленение (Spherical Joint). Так как Spherical Joint выдает нам сигнал в кватернионах, то данный сигнал требовал преобразования для привычного нам отображения и сравнения с сигналом задания. Для этого преобразования использовался функциональный блок Quaternions to Rotation Angles.

4.5 Реализация обратной задачи в Simulink

Обратная задача в модели реализована в отдельном блоке – Блок решения обратной задачи.

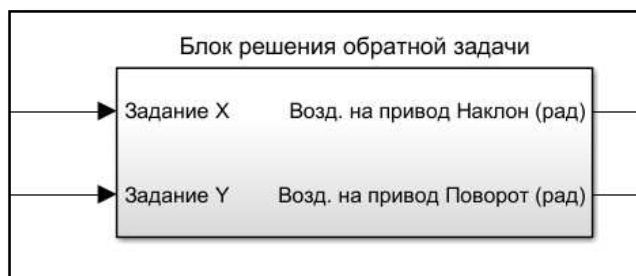


Рисунок 4.18 – Блок решения обратной задачи

Содержимое блока представлено на рисунках 4.19 и 4.20.

Вычисления в Simulink выполняются в радианах, перед выводом на график для удобства, сигнал преобразовывается в градусы.

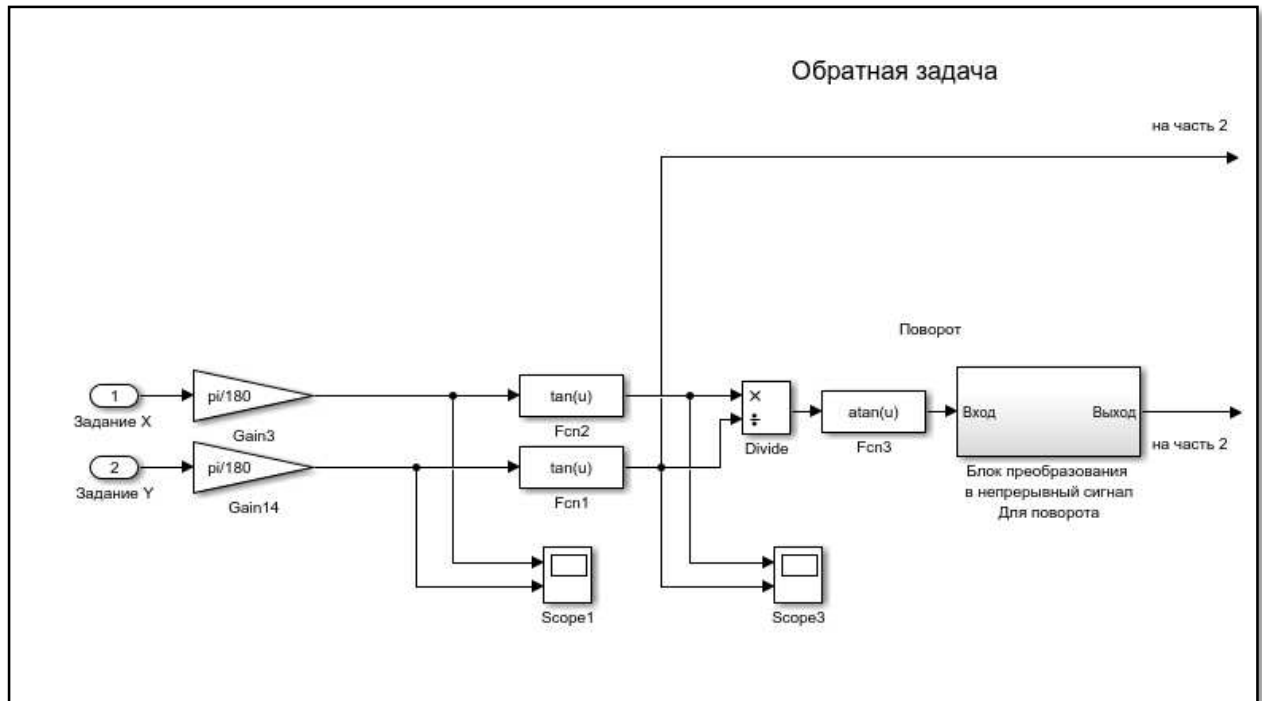


Рисунок 4.19 – Блок решения обратной задачи (часть 1)

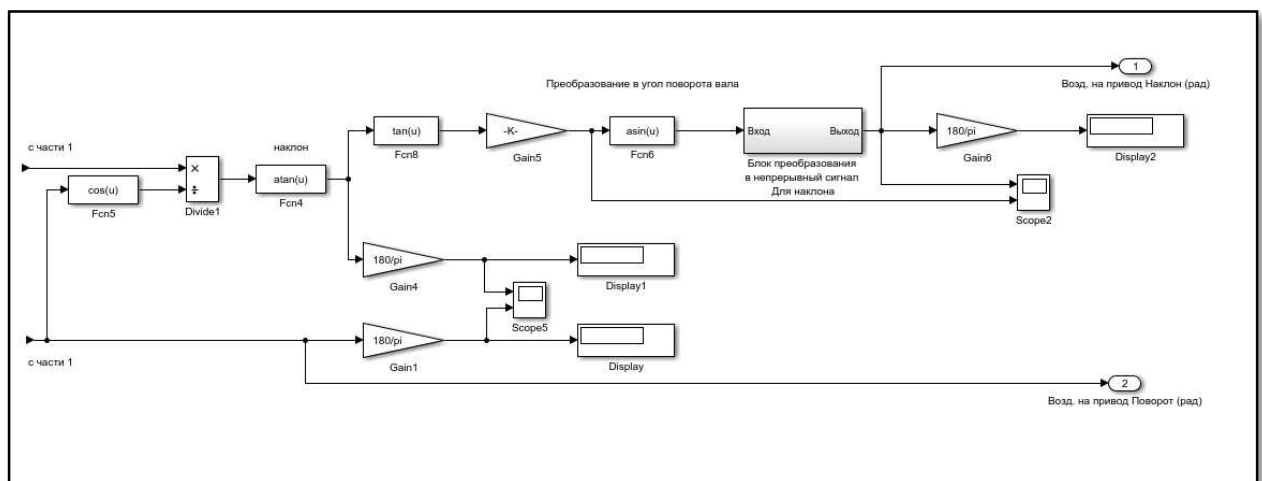


Рисунок 4.20 – Блок решения обратной задачи (часть 2)

После решения обратной задачи, мы получаем угол наклона выходного звена и угол поворота всего механизма. Угол поворота всего механизма

совпадает с поворотом вала соответствующего сочленения. А угол наклона выходного звена требует дополнительных преобразований. Угол наклона выходного звена нужно преобразовать в угол поворота соответствующего вала. Для этого используем формулу (2.1) для решения прямой задачи однокоординатного дефлектора.

И выразим из нее x .

$$x(\beta) = \arcsin\left(\frac{\tan \beta}{\tan \gamma}\right) \quad (4.28)$$

В модели эта формула представлена в части «преобразование в угол поворота вала» на рисунке 4.20.

Также после решения обратной задачи сигнал имеет точки разрыва, они появляются в результате использования в вычислениях тригонометрической функции арктангенса (atan). Так как в дальнейшем сигнал используется для задания положения привода, в таком виде он не может адекватно управлять им. Поэтому для решения этой проблемы в блок решения обратной задачи введен еще один блок – Блок преобразования в непрерывный сигнал. Содержимое этого блока представлено на рисунке 4.21.

Идея заключается в том, чтобы соединить отрезки сигнала в точке разрыва. Сначала находится точка разрыва, для этого сдвигаем сигнал на один цикл, и путем сравнения точек этих сигналов в одинаковый момент времени. Если эта разница больше определенной величины (в нашем случае он равен величине π , но для корректного выполнения задачи необходимо взять чуть меньше, например, 3), то увеличиваем, либо уменьшаем введенный нами коэффициент, на который в последствии мы умножаем π и прибавляем к исходному сигналу. На выходе мы имеем непрерывный сигнал, который можем использовать для управления приводом.

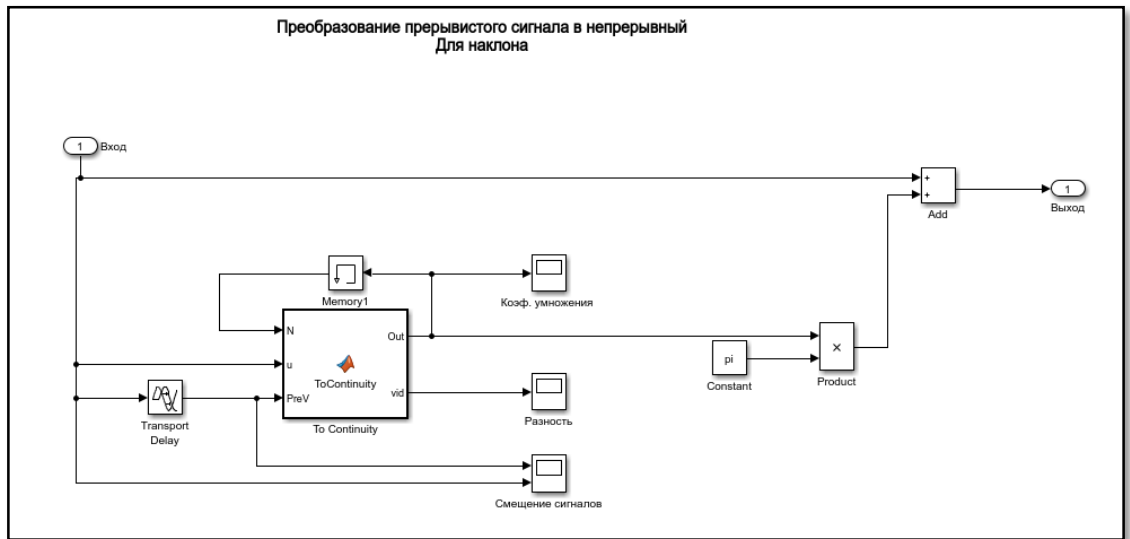


Рисунок 4.21 – Блок преобразования в непрерывный сигнал

Блок «To Continuity» вызывает функцию, которая определяет момент, когда происходит разрыв функции.

Листинг функции «To Continuity»:

```
function [Out,vid] = ToContinuity(N,u,PreV)

if (PreV - u) > 3 %90
    N = N+1;
end

if (PreV - u) < -3 %Если %90
    N = N-1;
end

vid = (PreV - u);
Out = N;
end
```

4.6 Проверка правильности реализация обратной задачи

Для проверки решения обратной задачи вынесем «Блок решения обратной задачи» в отдельный файл.

На вход «Блока решения обратной задачи» подаем желаемую траекторию. Выходные данные решения обратной задачи подаем на входы «Блока решения

прямой задачи». Здесь стоит обратить внимание на то, что для решения прямой задачи используется угол наклона выходного звена. Поэтому на блок решения прямой задачи стоит заводить сигнал до преобразования в угол поворота вала. В итоге на выходе мы должны получить сигналы идентичные исходным.

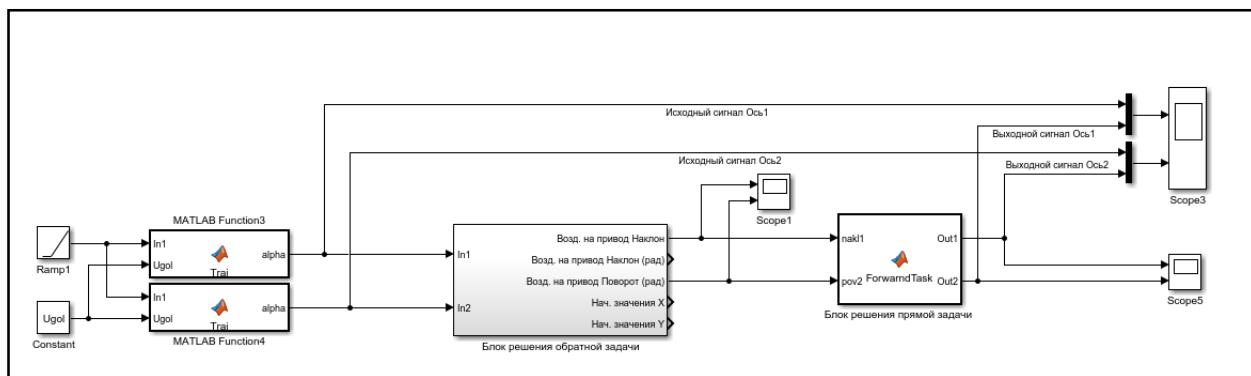


Рисунок 4.22 – Модель проверки обратной задачи

Листинг функции ForwardTask:

```
function [Out1, Out2]= ForwardTask(nak11,pov2)

Out1 = atan(tan(nak11)*cos(pov2));
Out2 = atan(tan(nak11)*sin(pov2));

Out1 = Out1*180/pi;
Out2 = Out2*180/pi;

end
```

Графики выходных и исходных сигналов представлены на рисунке 4.23.

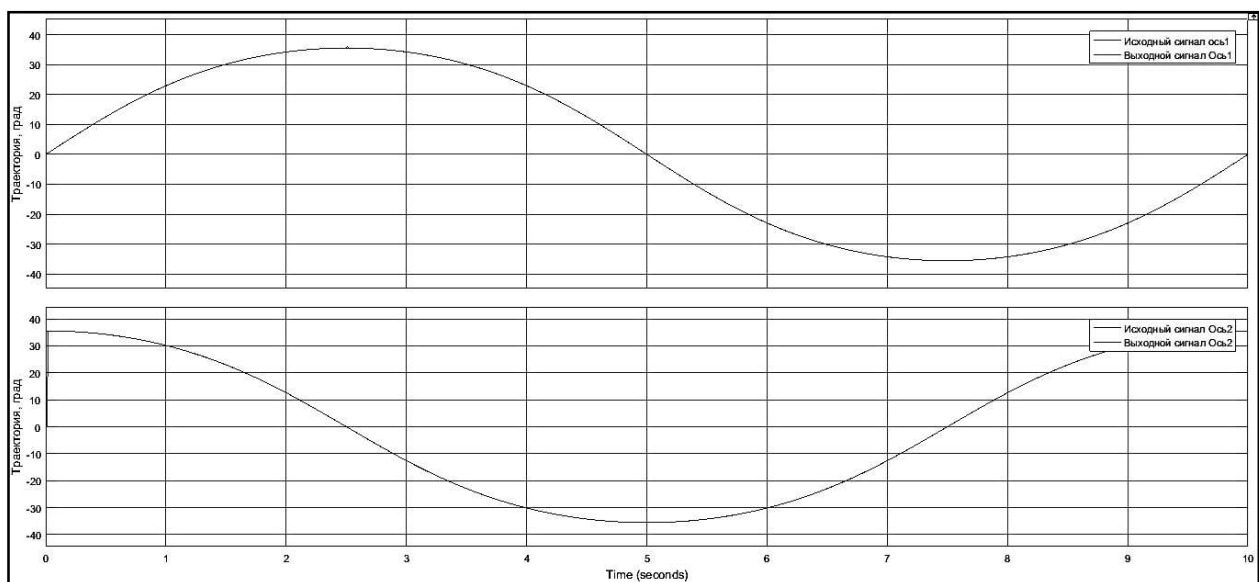


Рисунок 4.23 – Сравнения сигналов

Из графиков на рисунке 4.23 видно, что сигнал после последовательного решения обратной и прямой задачи полностью соответствует исходному сигналу.

Из приведенного выше можно сделать вывод, что обратная задача, реализованная в Simulink, обрабатывает корректно.

4.7 Интеграция моделей двигателя и регуляторов в модель

В динамической модели комбинированная модель двигателя представлена в подсистеме Модель двигателя 1 и 2, а регулятор в подсистеме Регулятор 1 и 2. Содержимое подсистем 1 и 2 абсолютно идентично и представлено на рисунках 4.24 и 4.25.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

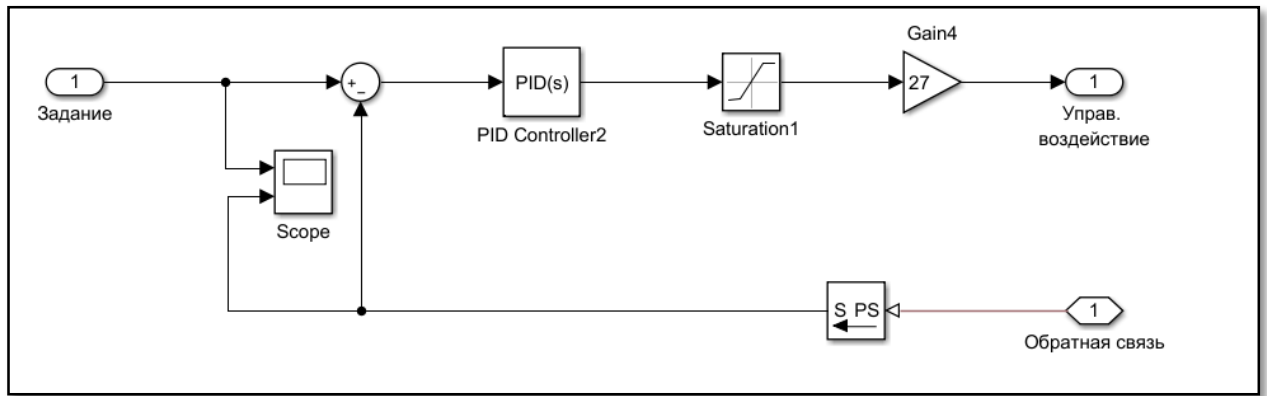


Рисунок 4.24 – Подсистема «Регулятор»

Так как первоочередной задачей стояла реализация управления по положению, в подсистеме регулятор реализован контур положения.

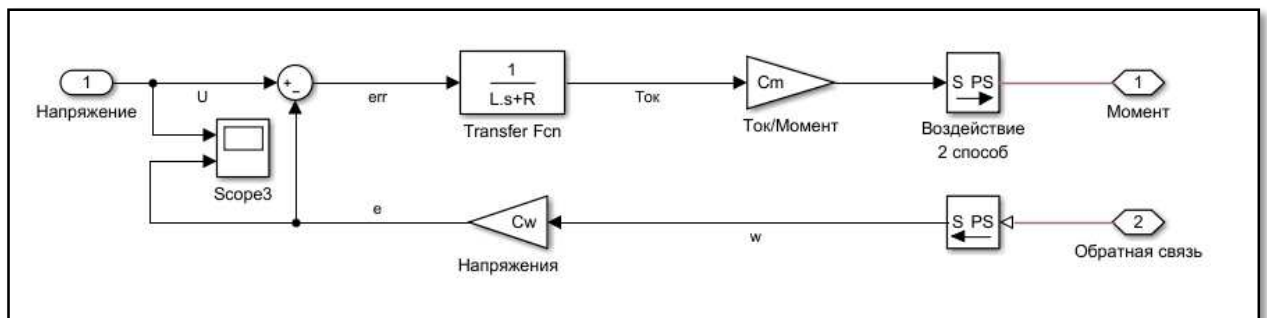


Рисунок 4.25 – Модель двигателя

В качестве характеристик двигателя были взяты характеристики двигателя постоянного тока ДБМ120-1-0,4-2, описанного выше. Они внесены в m-файл связанный с моделью.

`%% Параметры модели`

```
L = 0.02;
R= 3.5;
Cw = (60/(2*pi))*(27/500);
Cm = 0.55;
```

Ранее управляющим воздействием в модели служило задание положения, после добавления комбинированной модели ДПТ, управляющим воздействием

стал момент, так как выходом модели ДПТ является момент. Следовательно, для согласования модели ДПТ и динамической модели механизма необходимо в блоках сочленений изменить способ управления. Это выполняется в свойствах сочленения во вкладке Actuator. Необходимо выставить параметры как показано на рисунке 4.26.

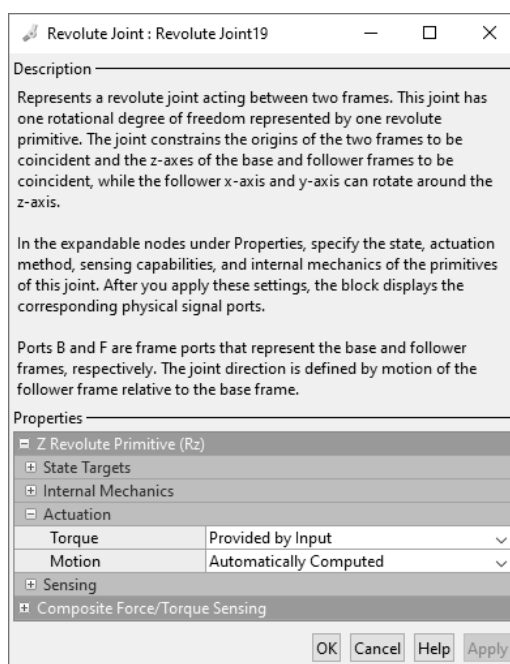


Рисунок 4.26 – Изменение способа управления

Теперь модель ДПТ и динамическая модель механизма согласованы. Для выполнения поставленной задачи на данном этапе необходимо произвести настройку регуляторов. Как мы помним модель кинематическая передача – нелинейная. Поэтому целесообразней использовать для настройки регуляторов стандартные средства Simulink. Такой способ настройки позволяет нам сразу же увидеть реакцию системы на единичный отклик. Таким образом, мы можем настроить вид переходного процесса, быстродействие системы, а также перерегулирование.

Для того чтобы запустить стандартные средства настройки регулятора, необходимо в настройках регулятора нажать на кнопку «Tune...». Откроется окно настройки.

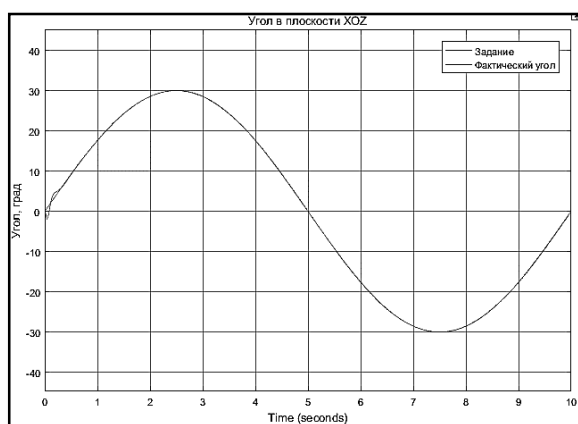
5 Реализация траекторного управления

Для реализации траекторного управления нужно начать с простой траектории, так как контур положения уже реализован, выберем простую траекторию. Наглядно будет выглядеть движение по окружности.

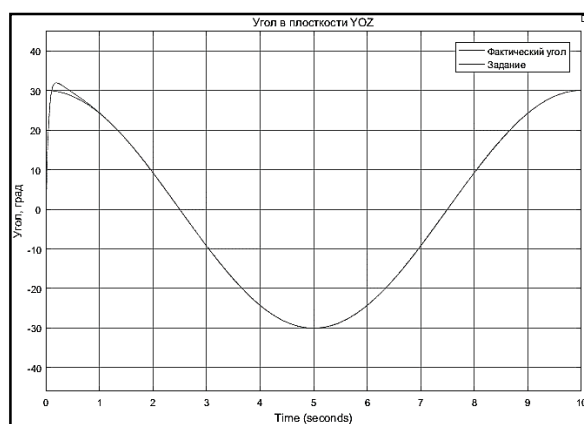
Движение по окружности определяется изменением углов по закону косинуса и синуса. Таким образом, подадим на один вход обратной задачи косинус, а на другой синус помноженные на радиус. Радиус выберем случайно.

Получается, чтобы дефлектор двигался по окружности, один привод должен наклонить дефлектор на определенный угол, который определяется радиусом. А другой привод должен равномерно вращаться вокруг оси.

На рисунках 5.1а и 5.1б представлены результаты изменения углов в плоскостях XOZ и YOZ.



а) график угла u_x ;



б) график угла u_y ;

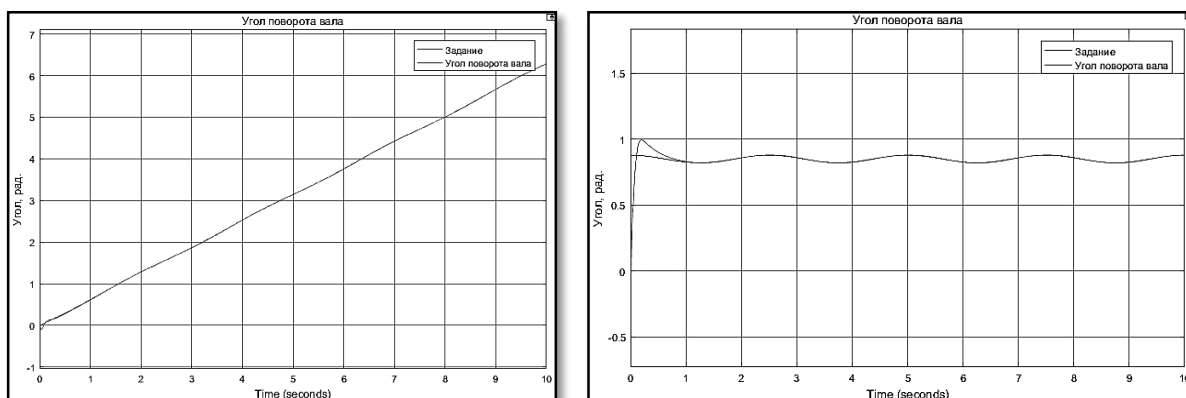
Рисунок 5.1 – График изменения углов u_x и u_y

Из данных графиков мы можем сделать вывод, что модель дефлектора отрабатывает задание корректно. Следовательно, и обратная задача, и регуляторы работают так, как нам необходимо.

Убедимся в том, что регуляторы работают корректно. Для этого посмотрим в график в блоке регулятора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На рисунках 5.2а и 5.2б представлены графики отработки задания двигателем.



а) график угла вала поворота;

б) график угла вала наклона;

Рисунок 5.2 – Графики положения вала

На представленных графиках видно, что привод, который устанавливает наклон механизма, не фиксируется в одном положении. Если внимательно посмотреть на график 5.1а то можно заметить, что график тоже нелинейный.

Из этого можно сделать вывод, для того чтобы задать данному механизму движение по окружности, недостаточно синуса и косинуса.

Нужно вспомнить, то что мы задаем не перемещение какой-либо точки механизма, в пространстве, а изменение углов α и β , которые и определяют траекторию движения механизма.

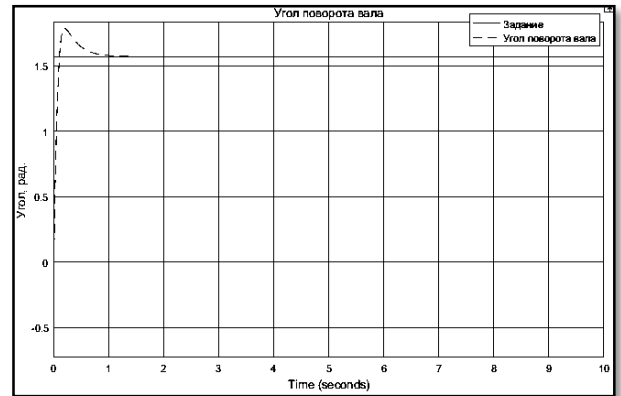
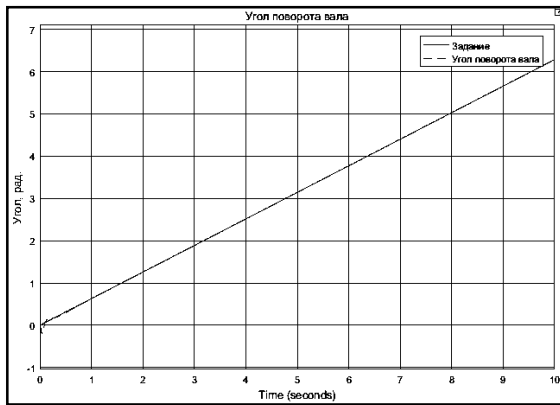
Следовательно, для того чтобы задать движение по окружности необходимо учитывать нелинейность механизма. Поэтому закон изменения углов должен определяться выражениями, которые описаны в пункте 2.3:

$$y_x(\alpha, \beta) = \arctan(\cos \alpha \cdot \tan \beta) \quad (5.1)$$

$$y_y(\alpha, \beta) = \arctan(\sin \alpha \cdot \tan \beta) \quad (5.2)$$

Подадим данные законы изменения углов, и посмотрим на результат.

На рисунках 5.3а и 5.3б представлены графики положения валов.



а) график угла вала поворота;

б) график угла вала наклона;

Рисунок 5.3– Графики положения валов

Рассмотрев графики видно, что 5.3а является линейным, а на графике 5.3б отсутствует какая-либо колебательность. Из чего можно сделать вывод, что движение по окружности задается формулами 5.1 и 5.2.

С простой траекторией разобрались, теперь сведем задачу к построению траектории через заданные точки.

Сначала зададим целевые точки, через которые необходимо будет пройти, а также момент времени для этой координаты.

Теперь нам нужно соединить эти точки так, чтобы траектория была плавной и при этом не выходила за ограничения. Ограничения задаются конструктивными особенностями механизма.

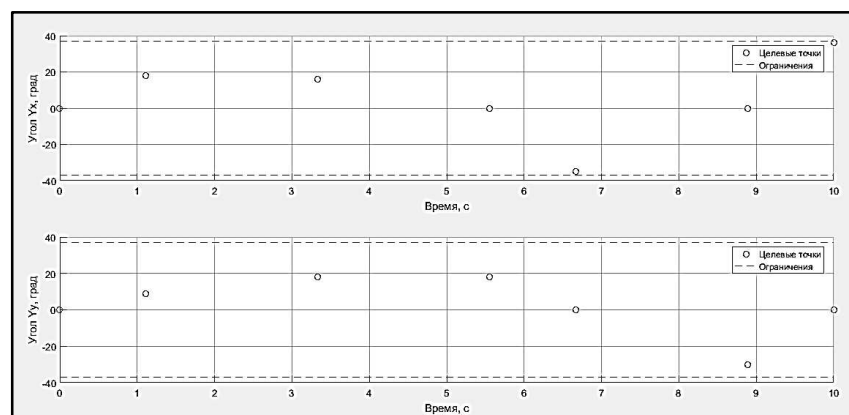


Рисунок 5.4 – Целевые точки

Для выбора плавной траектории воспользуемся пакетом `cftool`. Вносим в него наши данные и выбираем способ аппроксимации.

Самая плавная траектория получается при способе аппроксимации представленном на рисунке 5.5

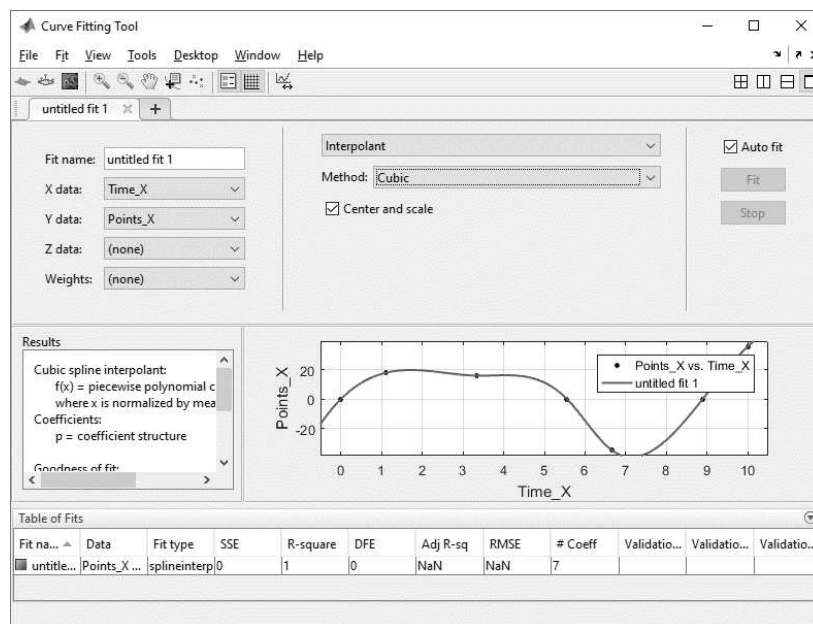


Рисунок 5.5 – Окно пакета `cftool`

Данный способ соответствует функции `spline()` в Matlab, на рисунке 5.6 представлены графики аппроксимации данным способом.

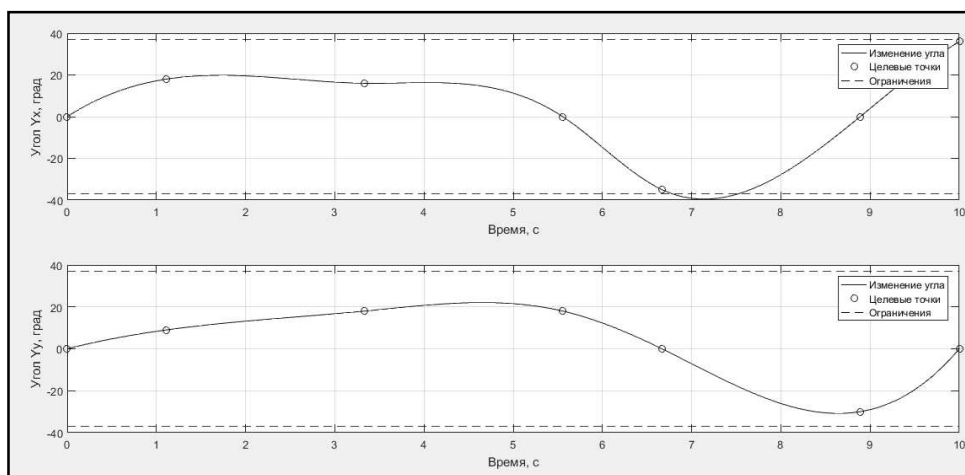


Рисунок 5.6 – Метод аппроксимации функцией `spline()`

Из данных графиков видно, то что такой метод аппроксимации нам не подходит, так как он не удовлетворяет нашим условиям, а именно задание угла будет выходить за границы, что в нашем случае физически невозможно. При построении траектории движения — это более заметно.

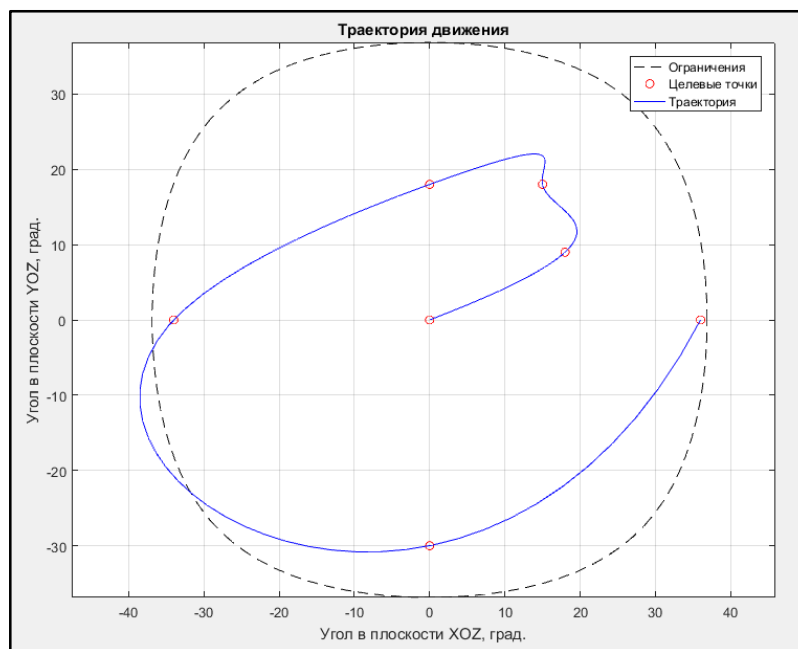


Рисунок 5.7 – Траектория при аппроксимации функцией spline()

Следовательно, нужно искать другой метод.

При следующем методе аппроксимации траектория получается менее плавной.

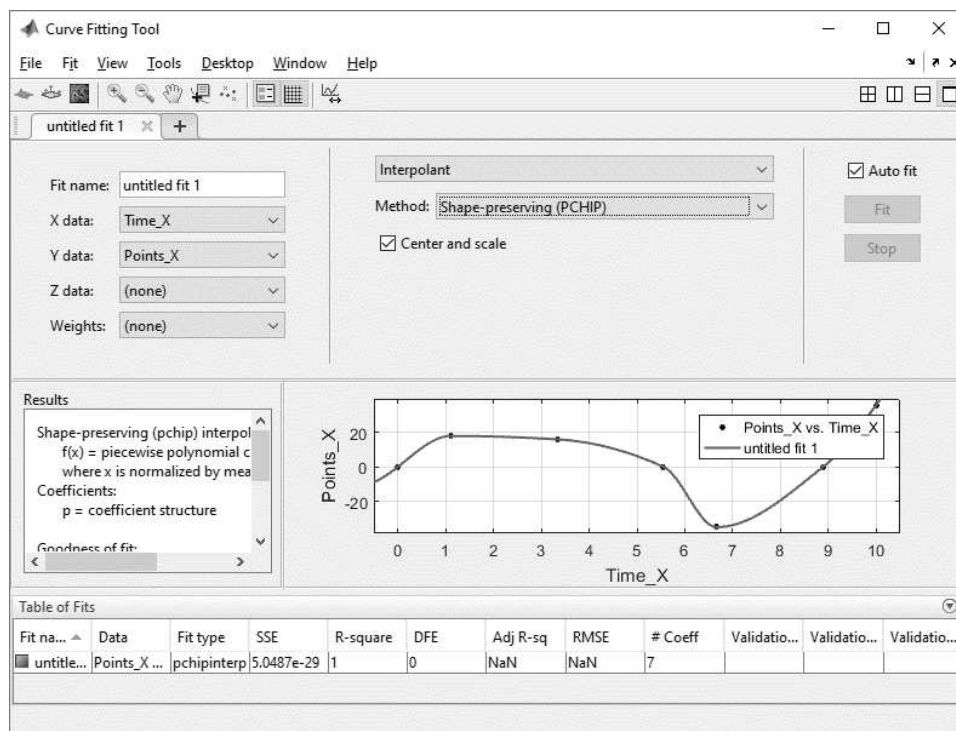


Рисунок 5.8 –Окно пакета cftool, метод pchip()

Данный метод соответствует функции `pchip()`. Следовательно, будем проводить аппроксимацию с помощью данного метода.

Рассмотрим подробнее алгоритм работы данного метода.

Функция `pchip()` интерполирует, используя кусочно-кубический полином $P(x)$ со следующими свойствами:

- на каждом подинтервале $x_k \leq x \leq x_k + 1$ полином $P(x)$ является кубическим интерполяционным полиномом Эрмита для заданных точек данных с указанными производными (наклонами) в точках интерполяции.

- $P(x)$ интерполирует y , то есть $P(x_j) = y_j$, а первая производная $\frac{dP(x)}{dx}$ непрерывно. Вторая производная $\frac{d^2P(x)}{dx^2}$ может иметь разрыв в точках на x_j .

- кубический интерполант $P(x)$ сохраняет форму. Наклоны в точке x_j выбираются таким образом, что $P(x)$ сохраняет форму данных и учитывает монотонность [10].

На рисунке 5.9 представлена аппроксимация методом $\text{rchip}()$.

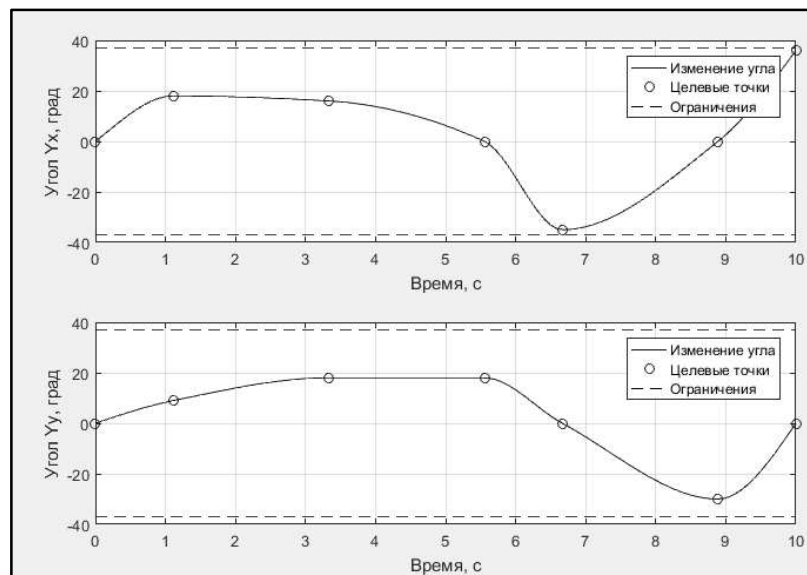


Рисунок 5.9 – Метод аппроксимации функцией $\text{rchip}()$

Из графиков на рисунке 5.9 можно сделать вывод, что данный метод соответствует нашим требованиям, и мы можем его использовать для построения траектории.

С помощью функции $\text{rchip}()$ построим траекторию через заданные точки, и выведем на график траекторию движения механизма в координатах u_x и u_y (рисунок 5.10).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

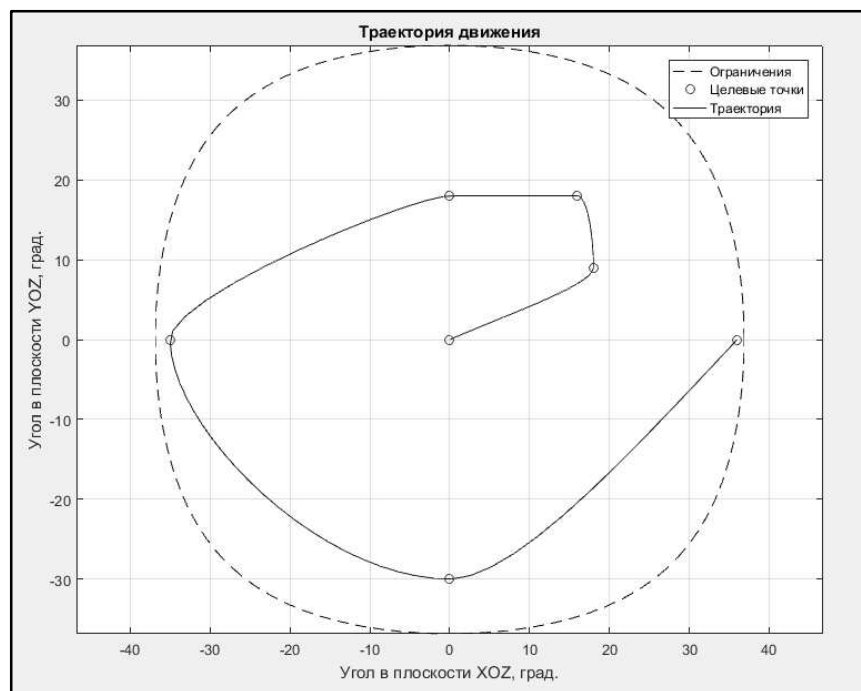


Рисунок 5.10 – Траектория в углах u_x и u_y

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 15.04.06 ПЗ

Лист

93

6 Исследование системы управления

Для исследования системы управления воспользуемся методом задания траектории, описанным выше.

Возьмем 7 случайных точек, учитывая конструктивный угол, в диапазоне от -36.87 до 36.87 градусов.

Например, следующий набор:

$$P1 = [-0;0]$$

$$P2 = [-12;8]$$

$$P3 = [-14;26]$$

$$P4 = [11;-15]$$

$$P5 = [28;-10]$$

$$P6 = [15;-30]$$

$$P7 = [-14;-16]$$

Графики изменения углов приведены на рисунке 6.1.

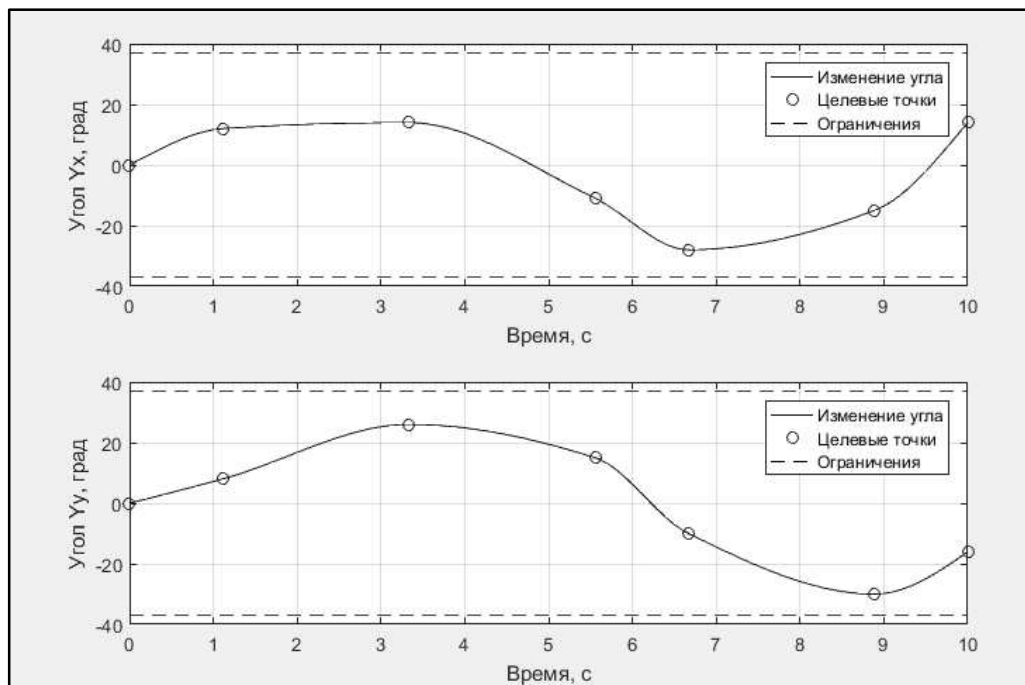


Рисунок 6.1 – Графики изменения углов u_x и u_y

Из графиков видно, что все целевые точки и построенная траектория не нарушает наших ограничений.

Выведем траекторию на график (рисунок 6.2).

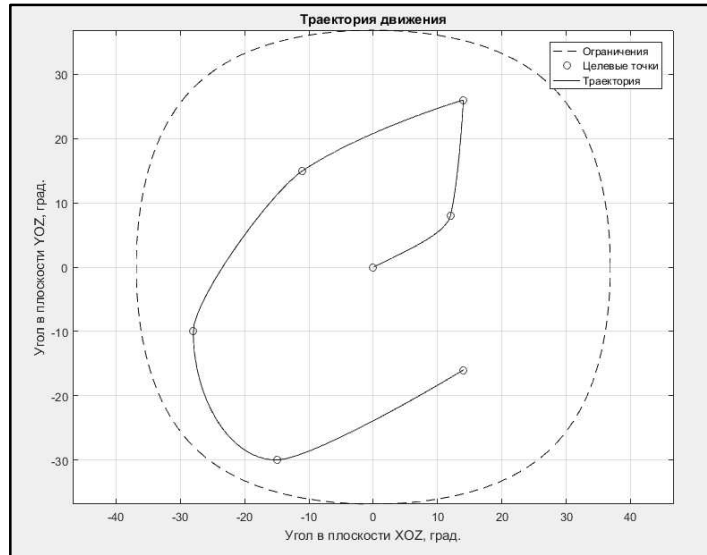


Рисунок 6.2 – Целевая траектория

Данный график так же подтверждает, что все точки траектории находятся в рабочей зоне.

Таким образом, подадим законы изменения углов u_x и u_y в модель и посмотри на результаты.

Результаты эксперимента представлены на рисунках 6.3 и 6.4.

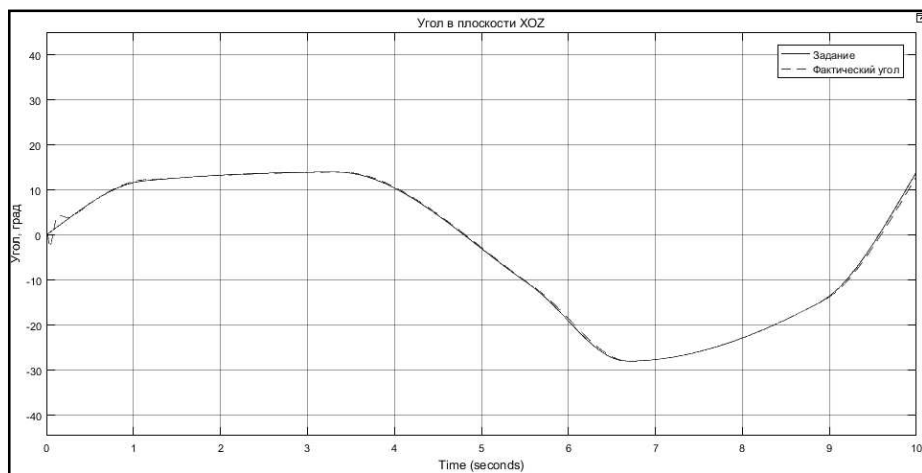


Рисунок 6.3 – График изменения угла u_y

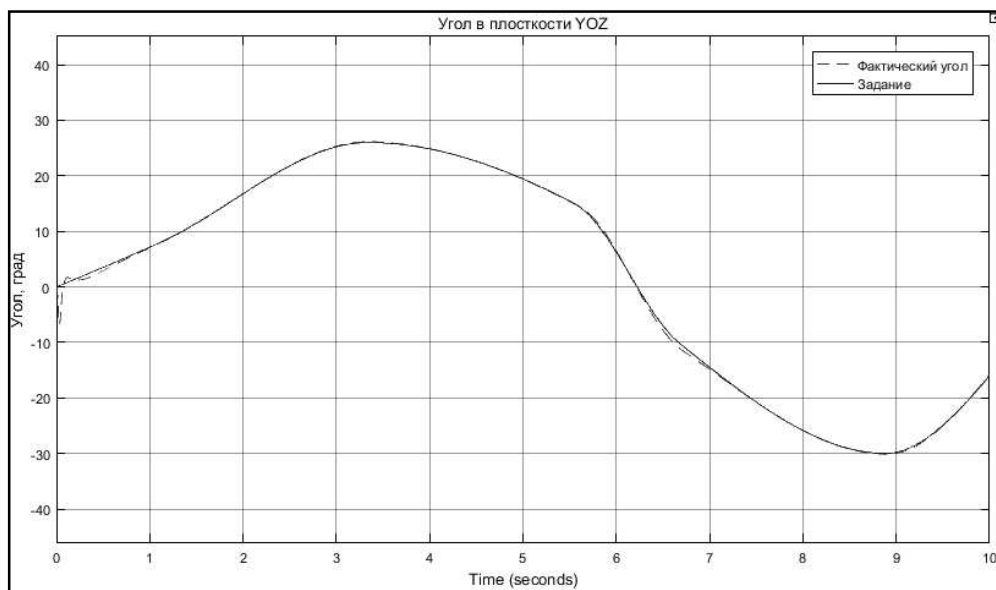


Рисунок 6.3 – График изменения угла u_γ

При внимательном рассмотрении графиков видно, что в начальный момент времени появляется рассогласование задания и положения. Это можно объяснить тем, что регуляторы не взаимосвязаны и в начальный момент времени они мешают друг другу. Из-за чего и появляется рассогласование.

Также данную проблему можно решить, применив управление по скорости.

В результате видно, что в начальный момент времени, когда идут переходные процессы, появляется разногласие задания и положения. Это можно решить, реализовав взаимосвязанные регуляторы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

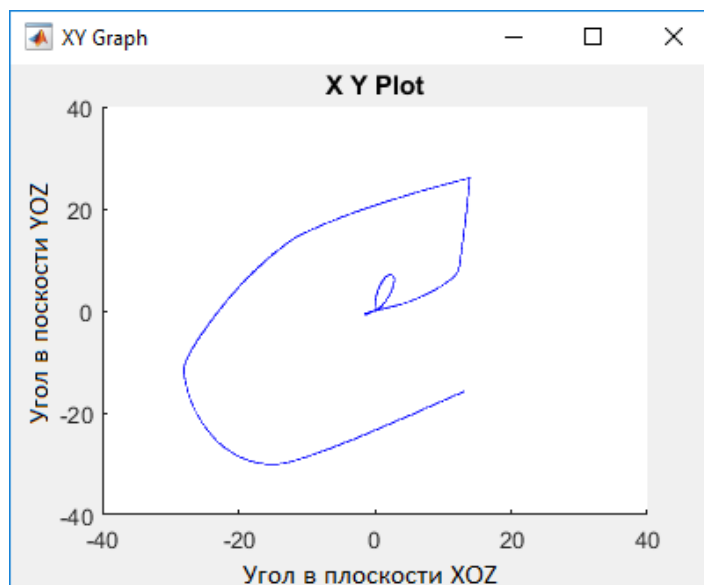


Рисунок 6.4 – Полученная траектория

Рассчитаем ошибку позиционирования в момент времени, когда механизм должен находиться в целевой точке.

Для этого из координат целевой точки вычтем координаты положение механизма в тот же момент времени по каждой из осей. Затем по теореме Пифагора вычислим итоговую ошибку для каждой целевой точки и отобразим их на графике. График представлен на рисунке 6.5.

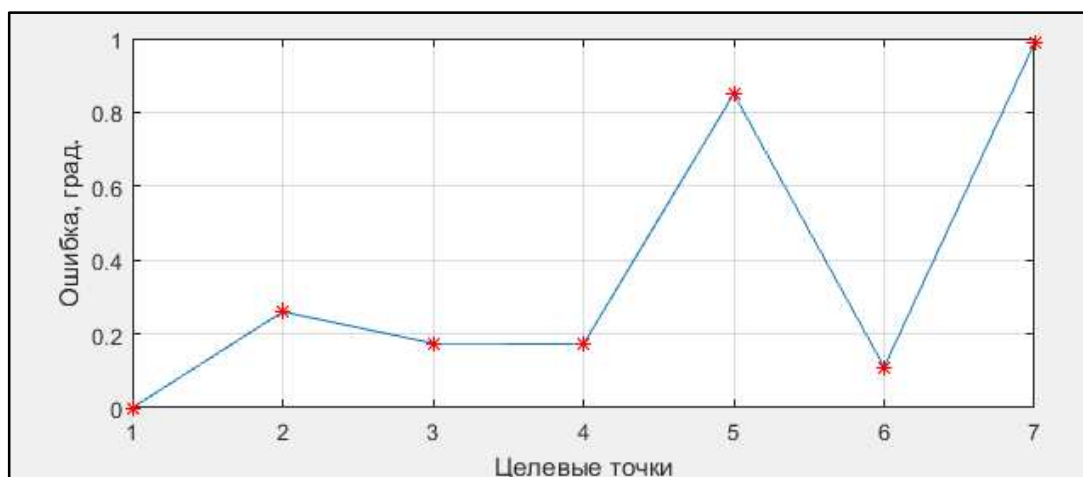


Рисунок 6.5 – График ошибки в целевых точках

Как показали результаты исследования, показанные на рисунке 6.5, система управления на базе регулятора (рисунок 4.24), модели двигателя

(рисунок 4.25) модели механизма (рисунок 4.15) с обратной связи по положению при подаче на вход синтезированного закона управления в соответствии с разделом 5, обеспечивает высокое качество слежения с погрешностью менее ± 1 градуса.

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		98

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной магистерской диссертации разработана и исследована модель мехатронного модуля неравноплотного сканирования пространства, в том числе разработаны алгоритмы системы управления, которые учитывают нелинейность механизма, и позволяют позиционировать дефлектор на заданную точку в пространстве, а также выполнять движение через заданные точки в пространстве и времени.

В совокупности 3D-модель в среде SolidWorks и динамическая модель в среде Matlab позволяют рассчитать напряженности механизма в целом и заданных точках приложения сил (моментов), рассчитанных в динамической модели. Такие исследования позволяют выявить слабые места механизма и избежать связанных с ними проблем, что будет актуально проектировании изделия.

В диссертации представлен проект учебного стенда, в котором реализована конструкция привода с коаксиальными валами. Такой стенд наглядно демонстрирует работу дефлектора, а также отражает его преимущества в сравнении с другими опорно-поворотными устройствами.

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		99

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 2306585 Российская федерация, МПК. Двухкоординатный дефлектор / С. Н. Круглов, Е. С. Малахов, В. М. Соловьюк, патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Красноярский государственный технический университет (КГТУ), ООО «Цент мехатронных технологий».

2. Малахов Е.С. Грищенко И.С. Устройство Устройство пространственного управления [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/236/2360163.html>.

3. Абрамов В.А. Опорно-поворотное устройство (его варианты) [Электронный ресурс]: - Н01Q3/08 – для изменения двух координат ориентации. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/213/2134003.html>.

4. Мухин Ю.В. Пыжиков В.П. Устройство для поворота антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [Электронный ресурс]: - Н01Q3/08 - для изменения двух координат ориентации. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/36/364999.html>

5. Кузькин А. Н. Опорно поворотное устройство антенны. [Электронный ресурс]: Н01Q3/08 – для изменения двух координат ориентации. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/200/2006110.html>.

6. Бесконтактные моментные электродвигатели серии ДБМ [Электронный ресурс]: Машинформ - режим доступа: <https://electro.mashinform.ru/mashiny-postoyannogo-toka-v-tom-chisle-beskontaktnye-ventilnye/beskontaktnye-momentnye-jelektrodvigateli-serii-dbm-obj4212.html>.

7. Резольверы оптические энкодеры и индуктивные датчики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.zettlex.com/ru/articles/%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%8B-%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%8D%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D1%80%D1%8B-%D0%B8-%D0%B8%D0%BD%D0%B4/>.

						МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			100

8. Справочки по цифровой схемотехнике [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://alnam.ru/book_spre.php?id=6.

9. Исследование кодового датчика положения [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.prorobot.ru/referats/r04/prorobot.ru-04-0003.pdf>.

10. Справочная документация Matlab [Электронный ресурс]: MathWorks – Режим доступа: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/pchip.html>.

					<i>МД – 15.04.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>101</i>

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А. Н. Сочнев
подпись инициалы, фамилия
« 11 » 07 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка и исследование мехатронного модуля неравноплотного
сканирования пространства

15.04.06 Мехатроника и робототехника

15.04.06.01 Технология автоматизации и роботизации производства.

Научный руководитель

Г. Б. Масальский
подпись, дата должность, ученая степень

Г. Б. Масальский
инициалы, фамилия

Выпускник

А. А. Пархоменко
подпись, дата

А. А. Пархоменко
инициалы, фамилия

Рецензент

П. Ф. Волков
подпись, дата должность, ученая степень

П. Ф. Волков
инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Продолжение титульного листа МД по теме разработка и исследование мехатронного модуля неравноплотного сканирования пространства.

Нормоконтролёр


подпись, дата

11.07.1977.

В.Н. Куликова

					МД – 15.04.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		2