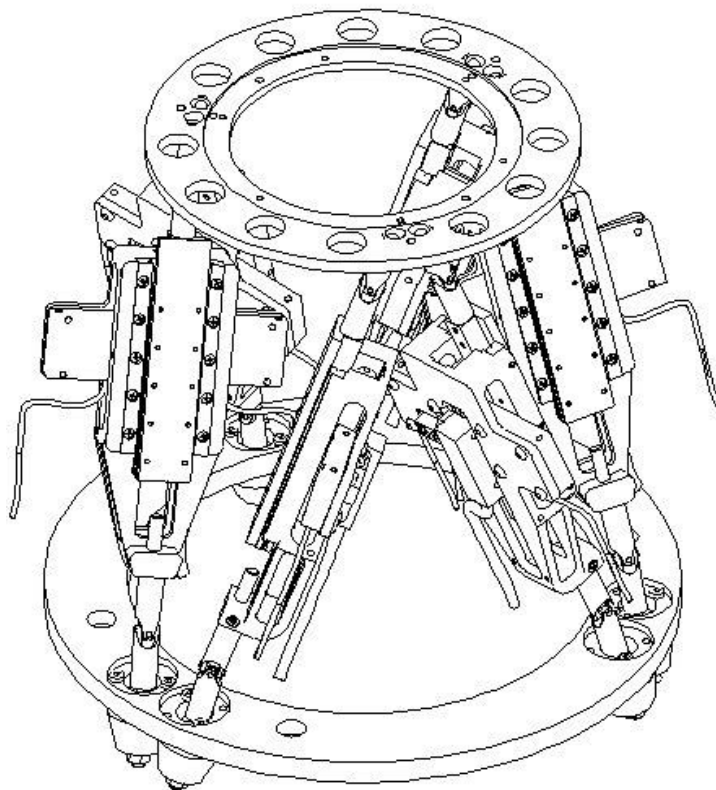


*В.М. Мусалимов  
Г.Б. Заморюев  
И.И. Каланышина  
А.Д. Перечесова  
К.А. Нуждин*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ  
СИСТЕМ В СРЕДЕ MATLAB  
(SIMULINK / SIMMECHANICS)**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2013**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**В.М. Мусалимов, Г.Б. Заморюев,  
И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова,  
К.А. Нуждин**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ В СРЕДЕ MATLAB (SIMULINK / SIMMECHANICS)**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 200100 «Приборостроение».



**Санкт-Петербург**  
**2013**

УДК 519.876.5:62-231

**Мусалимов В.М., Г.Б. Заморюев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин.** Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 114 с.

В учебном пособии изложены основы теории машин и механизмов и теоритической механики, а также методы математического моделирования в среде MATLAB различных механических систем и физических процессов. В пособии приведены модели механизмов, механических и измерительных систем выполненные с помощью библиотеки SimMechanics, пакета Simulink, среды MATLAB. В приложениях представлены необходимые данные для воспроизведения студентами моделей. К разделам пособия разработаны задания для самостоятельной работы студентов.

Данное пособие рекомендовано в качестве учебного пособия для магистров высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 200100 «Приборостроение» и 221000 «Мехатроника и робототехника», может быть полезно для студентов изучающих курсы «Теория механизмов и машин», «Проектирование мехатронных устройств», «Основы проектирования и конструирования приборов» для использования в магистерских программах «Системное моделирование в мехатронике», «Модульные технологии в биомехатронике и робототехнике», а также для преподавателей и научных работников, занимающихся вопросами курса «Теория механизмов и машин».

Рецензент: д.т.н., профессор В.А.Валетов

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Точной механики и технологий, протокол № 7 от 10.09.2013.

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.



© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© Мусалимов В.М., Г.Б. Заморюев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин, 2013

## Оглавление

Введение.....	5
1. Структура блоков MATLAB (SM).....	6
2. Плоские механизмы .....	9
2.1 Краткие теоретические сведения.....	9
2.2 Число степеней свободы плоского механизма.....	12
Пример 1. Физическая модель математического маятника.....	12
Пример 2. Кривошипно-ползунный механизм.....	15
Пример 3. Механизмы с зубчатым зацеплением .....	18
Пример 4. Модель устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов .....	21
Задачи для самостоятельной работы к разделу 2.....	29
3. Пространственные механизмы .....	35
3.1.Краткие теоретические сведения.....	35
Пример 1. Электромеханический модуль двухпараметрической антенны.....	36
Пример 2. Моделирование робота-манипулятора с простейшим захватным механизмом.....	40
Пример 3. Узел для полировки оптических стёкол .....	43
Задачи для самостоятельной работы к разделу 3.....	47
4. Реализация задач физического содержания .....	50
4.1.Краткие теоретические сведения.....	50
Пример 1. Модель трёхмассовой системы с упруго диссипативными силами.....	52
Пример 2. Построение статических моделей трения .....	55
Пример 3. Баллистическая задача.....	59
Задачи для самостоятельной работы к разделу 4.....	63
5. Создание двигателей.....	66
Пример 1. Кривошипно-коромысловый механизм.....	66
Пример 2. Модель устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов с синхронным двигателем.....	69

Приложения. Текст управляющих файлов и таблицы настройки блоков .....	73
Приложение А1 .....	74
Приложение А2 .....	76
Приложение А3 .....	79
Приложение А4 .....	82
Приложение Б1 .....	95
Приложение Б2 .....	100
Приложение Б3 .....	105
Приложение В1 .....	108
Приложение Г1 .....	111
Литература .....	113

## Введение

Для исследования кинематики и динамики механизмов различного уровня сложности эффективно применять моделирование с помощью библиотеки SimMechanics, пакета Simulink, среды MATLAB, предназначенной для моделирования пространственных движений твердотельных машин и механизмов на стадии инженерного проектирования. Дифференциальные уравнения записаны в виде структурной модели SimMechanics с использованием блоков, то есть механическая система представляется связанной блочной диаграммой. Блоки пакета являются моделями механических устройств, положение которых в пространстве и относительно друг друга может меняться в соответствии с законами механики. Модели SimMechanics изображают физическую структуру механизмов, геометрические и кинематические отношения их компонентов. SimMechanics автоматически преобразует эти структурные изображения во внутреннюю, эквивалентную математическую модель.

SimMechanics оперирует не с сигналами, а с механическими усилиями. Входы блоков задают «посадочные места» соответствующих механизмов. В силу третьего закона Ньютона, связи между «входами» и «выходами» нельзя рассматривать как однонаправленные. Эти связи служат для передачи силовых воздействий, которыми обмениваются части механизма или механизмы между собой. В связи с этим, для обозначения входов и выходов в SimMechanics не используются стрелки.

Моделирование механических систем и устройств осуществляется на основе законов кинематики, физики и механики. Основной целью моделирования механических систем с помощью библиотеки SimMechanics является выявление характера движения различных частей механизмов и машин (как в плоскости, так и в пространстве) относительно друг друга в той или иной системе координат. При этом учитываются связи между отдельными объектами и различные их движения в соответствии с теми или иными ограничениями.

Библиотека SimMechanics поддерживает средства анимации для демонстрации работы механизмов в динамике. Анимация строится на основе средств Microsoft Audio Video Interleave® (AVI), и ее видеофайлы имеют расширение .avi. Поддерживаются и средства OpenGL, в частности при рендеринге (функциональной окраске) трехмерных объектов и поверхностей. Виртуальные измерительные средства, такие как осциллограф и графопостроитель, поддерживаются в моделях этого пакета [10, 11, 15, 21].

# 1. Структура блоков MATLAB (SM)

Работа любого блока раздела Joints основана на векторном методе, который применяется в кинематическом исследовании механических систем. Он позволяет определить положения, скорости и ускорения звеньев механизма [4, 6, 8, 9].

Рассмотрим один из блоков раздела Joints (рис. 1.1, а) – Revolute. Данный блок обеспечивает одну степень свободы относительно выбранной оси  $x$ ,  $y$ , или  $z$ . Его работа описывается матрицей направляющих косинусов вида (1.1).

$$M_{ba} = \begin{pmatrix} \cos(\overset{\wedge}{x}_b, \overset{\wedge}{x}_a) & \cos(\overset{\wedge}{x}_b, \overset{\wedge}{y}_a) & \cos(\overset{\wedge}{x}_b, \overset{\wedge}{z}_a) \\ \cos(\overset{\wedge}{y}_b, \overset{\wedge}{x}_a) & \cos(\overset{\wedge}{y}_b, \overset{\wedge}{y}_a) & \cos(\overset{\wedge}{y}_b, \overset{\wedge}{z}_a) \\ \cos(\overset{\wedge}{z}_b, \overset{\wedge}{x}_a) & \cos(\overset{\wedge}{z}_b, \overset{\wedge}{y}_a) & \cos(\overset{\wedge}{z}_b, \overset{\wedge}{z}_a) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

где  $[x_a, y_a, z_a]$  – исходная система координат,

$[x_b, y_b, z_b]$  – повернутая система координат.

Направление вращения определяется по правилу правой руки. На рис. 1.1, а блок Revolute имеет одну вращательную степень свободы вокруг оси  $z$ . И, соответственно, его матрица управляющих косинусов принимает вид (1.2), что соответствует переходу проекций вектора  $w$  из системы координат  $O_a$  в систему  $O_b$  рис. 1.2, а.

$$M_{ba}^z = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{ba}) & -\sin(\varphi_{ba}) & 0 \\ \sin(\varphi_{ba}) & \cos(\varphi_{ba}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

а) 

Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS
R1	revolute	[0 0 1]	World

б) 

Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS
R1	revolute	[1 0 0]	World
R2	revolute	[0 1 0]	World
R3	revolute	[0 0 1]	World

в) 

Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS
P1	prismatic	[0 0 1]	World

г) 

Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS
P1	prismatic	[1 0 0]	World
P2	prismatic	[0 1 0]	World

д) 

Show Port	Port Side	Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Compor Axes
<input type="checkbox"/>	Left	CG	[0 0 0]	m	World	World
<input checked="" type="checkbox"/>	Left	CS1	[0 0 0]	m	CG	CG
<input checked="" type="checkbox"/>	Right	CS2	[0 0 0]	m	CG	CG

Рисунок 1.1 - Блоки раздела Joints

Для отображения смещений систем координат относительно друг друга за счет длин звеньев  $L$  матрицу направляющих косинусов  $M_{ba}$  необходимо умножить на вектор-столбец линейных смещений  $R_{ba}$  (1.3). Матрица  $R_{ba}$  задается в блоке Body в разделе Origin Position Vector рис. 1.1, д. Указанные смещения не добавляют системе дополнительных степеней свободы, а лишь обозначают наличие физических длин звеньев.

$$R_{ba} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Для Gimbal (рис. 1.1 б, рис. 1.2 б) и других блоков раздела Joints, включающих вращательные степени свободы относительно нескольких осей, справедлива матрица направляющих косинусов вида (1.1) или ее эквивалент в матричной форме (1.4).

$$M_{ba} = M_{ba}^x \cdot M_{ba}^y \cdot M_{ba}^z \quad (1.4)$$

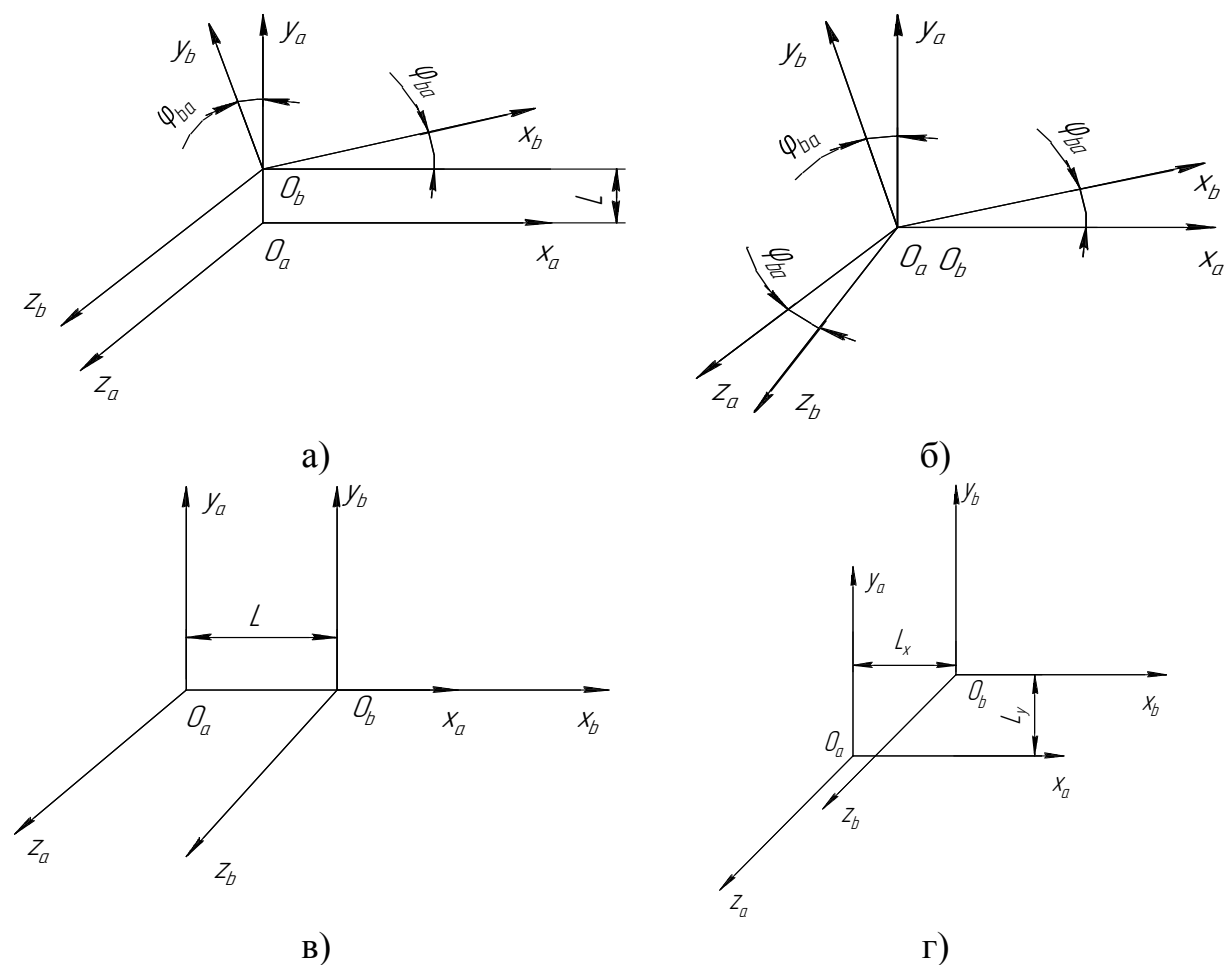


Рисунок 1.2 – Переход проекций вектора  $w$  из системы координат  $O_a$  в систему  $O_b$



Для описания кинематических пар, обладающих поступательными степенями свободы, таких как Prismatic, In-plane (рис. 1.1 в, г; рис. 1.2 в, г) и других, используется матрица перемещений вида (1.5):

$$F_{ba} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Важнейшим элементом при создании модели механизма в SimMechanics является блок Body (рис.1.1, д). Его структура позволяет полностью определить физические параметры материальных тел: массу, тензор инерции, геометрический центр масс, длину, объем элемента, положение координатных систем и ориентацию их относительно друг друга.

Связка блоков Machine Environment и Ground задает гравитационные силы, приложенные к центру координат и их ориентацию в заданной системе отсчета.

Библиотека SimMechanics предназначена для решения задач управляемого перемещения объектов. В данный момент времени и для данного положения системы нам известно положение и ориентация объекта, которые задаются в неподвижной системе координат  $O_a$  координатами  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  и углами Эйлера  $\phi_a$ ,  $\Theta_a$ ,  $\varphi_a$ . Через данные параметры устанавливается матрица связи между неподвижной системой  $O_a$  и системой координат  $O_M$ , связанной с центром М рабочего тела механизма (1.6):

$$A_M = M_M(x_a, y_a, z_a, \phi_a, \Theta_a, \varphi_a) \quad (1.6)$$

С другой стороны, эту связь можно установить через локальные системы координат механизма:

$$A_M = M_{ab}(q_1)M_{bc}(q_2)\dots M_{(n-1)n}(q_n)M_{nM} = M_M(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (1.7)$$

Приравняв матрицы (1.7), получим систему уравнений для определения функций положения механизма (1.8):

$$q_j = q_j(x_a, y_a, z_a, \phi_a, \Theta_a, \varphi_a), \quad j = 1, \dots, n. \quad (1.8)$$

В общем случае, из сравнения матриц получим 9 уравнений, но независимых уравнений будет  $n$  (по количеству обобщенных координат).

В пособии показаны решения задачи анализа кинематики различных механизмов с помощью библиотеки SimMechanics.

## 2. Плоские механизмы

### 2.1 Краткие теоретические сведения

#### **Классификация связей. Число степеней свободы.**

Несвободной называется система материальных точек, на движение которых (координаты, скорости и ускорения) наложены некоторые ограничения (связи). Всякий механизм является примером несвободной системы материальных точек.

**Связанные физические тела** – физические тела, налагающие ограничения на координаты, скорости и ускорения точек материальной системы.

**Связи делятся на двухсторонние и односторонние.**

**Связи называются двухсторонними (удерживающими)**, если они препятствуют перемещениям материальных точек в некоторых направлениях, а также в направлениях прямо противоположных.

**Связи называются односторонними (неудерживающими)**, если они препятствуют перемещениям материальных точек в некоторых направлениях, но допускают перемещения в прямо противоположных направлениях.

**Связи делятся также на голономные и неголономные.**

**Голономными (интегрируемыми)** называются связи, которые накладывают ограничения на положения точек материальной системы (конечно, после дифференцирования уравнения связи по времени можно получить также зависимость между координатами и скоростями точек системы).

**Неголономными (неинтегрируемыми)** называются связи, которые накладывают ограничения на скорости точек системы. Они выражают зависимость между координатами и скоростями точек системы. Независимо от дифференциальных уравнений движения системы уравнения этих связей не могут быть проинтегрированы. Примером неголономной системы является шар, катящийся по шероховатой плоскости.

**Числом степеней свободы системы материальных точек, подчиненной голономным связям, называется число независимых параметров, однозначно определяющих положения точек системы.**

Таким образом, твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси, имеет одну степень свободы, так как положение этого твердого тела вполне определяется углом поворота  $\varphi$  вокруг оси вращения.

Твердое тело, совершающее плоское движение, имеет три степени свободы, так как положение любого его сечения, проведенного параллельно неподвижной плоскости, определяется двумя координатами центра тяжести сечения  $X_c$ ,  $Y_c$  и углом поворота  $\varphi$ .

Системой с тремя степенями свободы является твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной точки. Его положение определяется тремя углами Эйлера  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $\theta$ .

Системой с шестью степенями свободы является свободное твердое тело, так как его положение определяется шестью независимыми параметрами: тремя координатами центра тяжести  $X_c$ ,  $Y_c$ , и  $Z_c$  и тремя углами Эйлера  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $\theta$ .

**Звено** – совокупность деталей, соединенных таким образом, что их взаимное положение не меняется при движении.

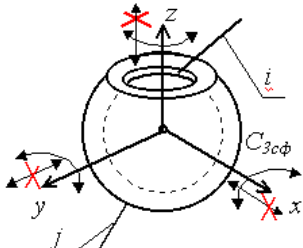
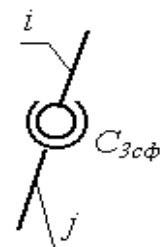
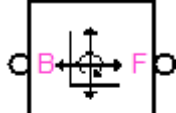
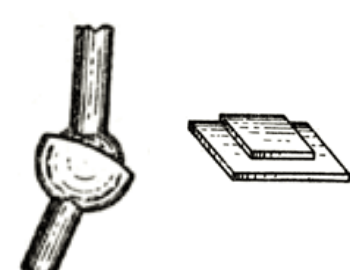

**Кинематическая пара** – соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительное перемещение в пространстве.

**Низшие кинематические пары** – это такие пары, в которых звенья касаются друг друга по поверхностям конечных размеров или по плоскости. К ним относятся поступательная и вращательная пары первого, второго и третьего класса, а также винтовая пара.

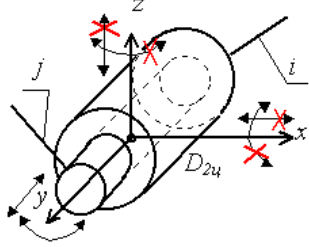
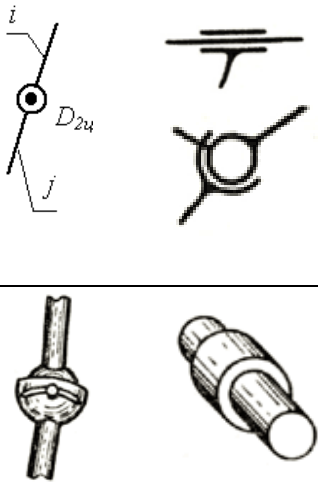
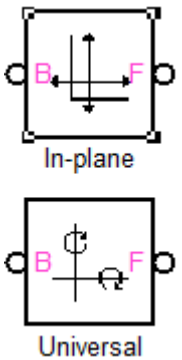
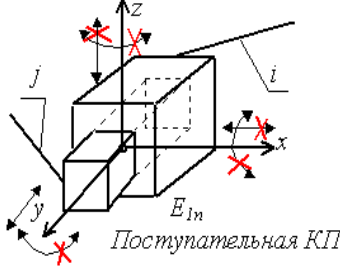
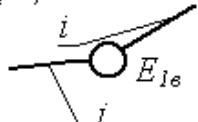
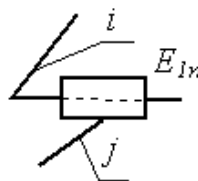
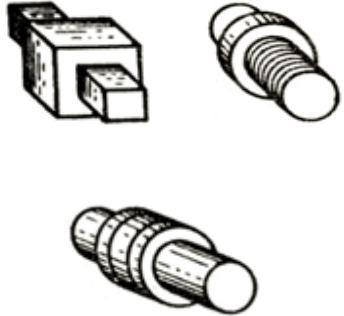
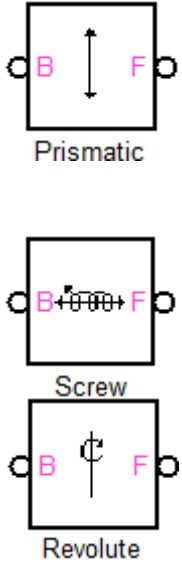
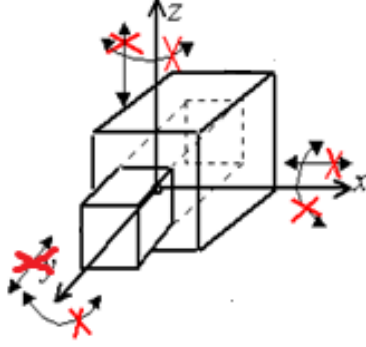



**Высшие кинематические пары** – это пары, в которых контакт элементов происходит по линии или в точке.

В таблице 2.1 приведена классификация низших кинематических пар и блоки библиотеки SimMechanics, соответствующие им [2].

Таблица 2.1 Классификация низших кинематических пар и блоки библиотеки SimMechanics

Вид кинематической пары	Число степеней свободы	Класс пары S	Обозначение на кинематических схемах	Блоки библиотеки SimMechanics раздел Joints
			Пример использования	
1	2	3	4	5
	3	3		 Planar
				
				 Gimbal

Продолжение Таблица 2.1

1	2	3	4	5
	2	4		 <p>In-plane</p> <p>Universal</p>
 <p>Поступательная КП</p>	1	5	<p>Вращательная КП</p>  <p>Поступательная КП</p>  	 <p>Prismatic</p> <p>Screw</p> <p>Revolute</p>
	0	-	 <p>Неподвижное соединение звеньев</p>  <p>Неподвижное звено, стойка, сварка</p>	 <p>Weld</p>

## 2.2 Число степеней свободы плоского механизма

Основные структурные формулы были составлены для плоских механизмов Чебышевым П.Л. и Грюблером М., для пространственных – Сомовым П.О. и Малышевым А.П.. Так как принципы, заложенные в построение всех этих формул одинаковы, то их можно записать в обобщенном виде (2.1):

$$W = H \cdot n - \sum_{i=1}^{H-1} (H-i) \cdot p_i \quad (2.1)$$

где:  $H$  – число степеней подвижности свободного твёрдого тела;

$n$  – число подвижных звеньев в механизме  $n=k-1$ ;

$k$  – общее число звеньев в механизме;

$i$  – число подвижностей в кинематической паре;

$p_i$  – число кинематических пар с  $i$  подвижностями.

Удобно пользоваться выражением (2.2), которое является следствием (2.1), и предназначено для вычисления числа степеней свободы плоского механизма [3, 5]:

$$W_n = 3(k-1) - 2P_5 - P_4, \quad (2.2)$$

где:  $k$  – общее число звеньев в механизме;

$P_5$  – количество пар пятого класса;

$P_4$  – количество пар четвёртого класса.

Рассмотрим на простейших моделях процесс построения механизмов в SimMechanics.

### Пример 1. Физическая модель математического маятника

В качестве первого примера в разделе 2 предлагается рассмотреть физическую модель математического маятника.

Математический маятник представляет собой тонкий, невесомый, нерастяжимый стержень заданной длины, на конце которого закреплен груз. В простейшем случае, уравнение колебаний математического маятника описывают обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$\ddot{x} + \omega^2 \cdot \sin(x) = 0, \quad (2.3)$$

где  $\omega$  – положительная константа, определяемая исключительно из параметров маятника. Неизвестная функция  $x(t)$  – это угол отклонения маятника в момент  $t$  от нижнего положения равновесия, выраженный в радианах;  $\omega = \sqrt{g/l}$ , где  $l$  – длина подвеса,  $g$  – ускорение свободного падения.

Математический маятник является системой с одной степенью свободы. Его кинематический анализ показывает, что невесомый стержень

маятника длиной  $l$  (рис. 2.1) соединён со стойкой  $O$  через вращательную кинематическую пару пятого класса (см. таблицу 2.1), поэтому для наложения кинематических ограничений рационально воспользоваться блоком Revolute библиотеки SimMechanics (SM), который обеспечивает одну вращательную степень подвижности относительно выбранной оси. В данном случае было принято, что маятник совершает колебания относительно оси  $Z$ .

Следующим шагом, который необходимо сделать при создании любой модели – это указать «землю», т.е. точку отсчёта (стойку), в которой будет располагаться глобальная система координат модели. Для указания «земли» необходимо использовать блок Ground библиотеки SM. В механизмах количество стоек различно. В модели может быть использовано столько стоек, сколько требует структурный анализ. Однако, при моделировании в SM, необходимо указать начало отсчёта для всей системы и подключить к нему вектор гравитационных сил, который задаётся блоком Machine Environment. В блоке Machine Environment гравитационные силы задаются относительно выбранной оси. При моделировании маятника начало координат помещено в точку  $O$  и совмещено со стойкой, а вектор гравитационных сил направлен в отрицательном направлении вдоль оси  $Y$  (рис.2.1) (см. приложение A1).

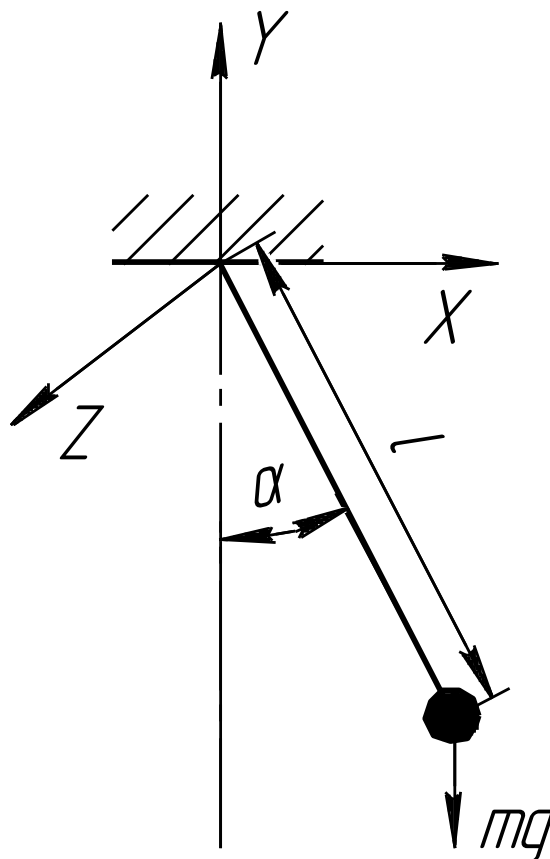


Рисунок 2.1 – Математический маятник

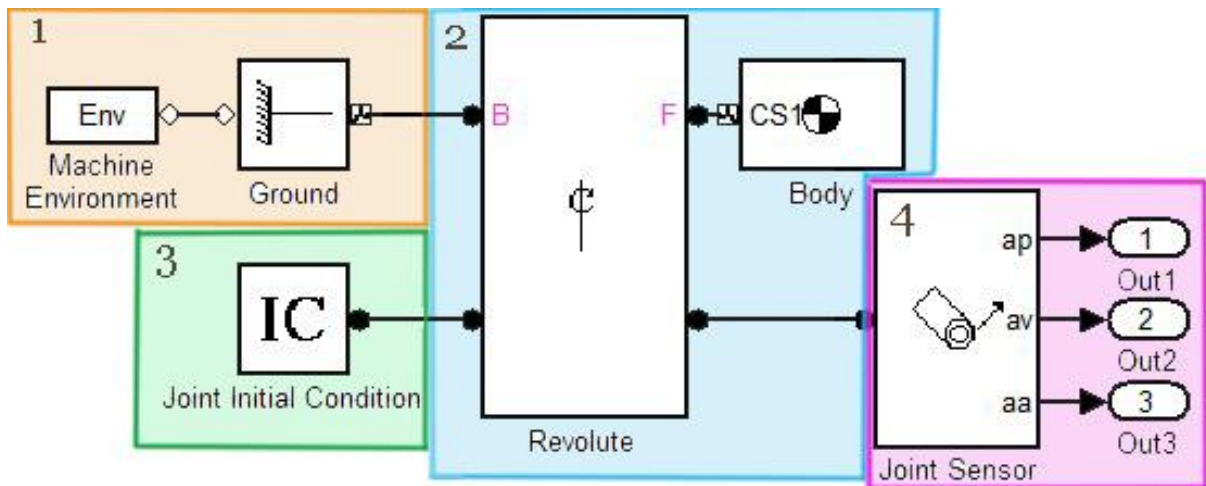


Рисунок 2.2 – Структурная модель SimMechanics математического маятника

1 – блоки Machine Environment, Ground – задаёт начало координат и гравитационные силы системы, 2 – Revolute, Body – формируют геометрию маятника, 3 – Joint Initial Condition устанавливает начальные условия для примитива R1 блока Revolute т.е. угол  $\alpha$ , 4 – Joint Sensor, Out 1...3 – получение выходных характеристик маятника.

Параметры и настройки каждого блока приведены в приложении А1.

На рис. 2.3 представлена анимированная модель SimMechanics, а на рис. 2.4 - результаты работы модели «математический маятник».

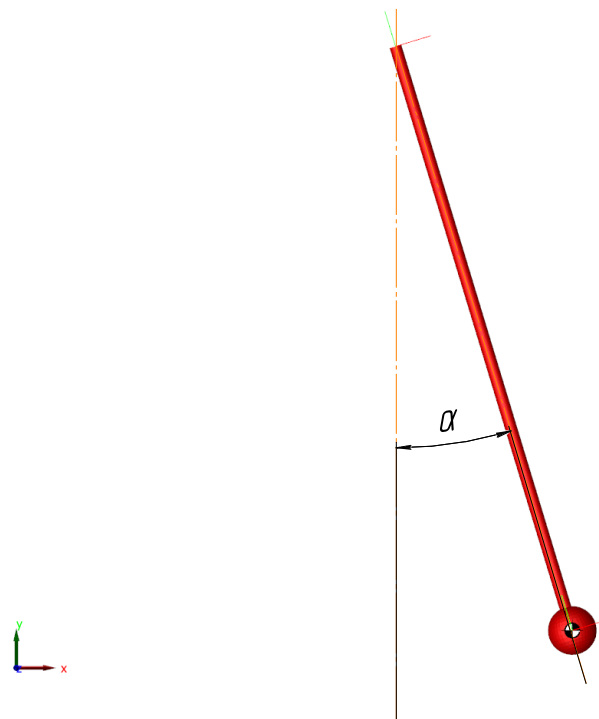
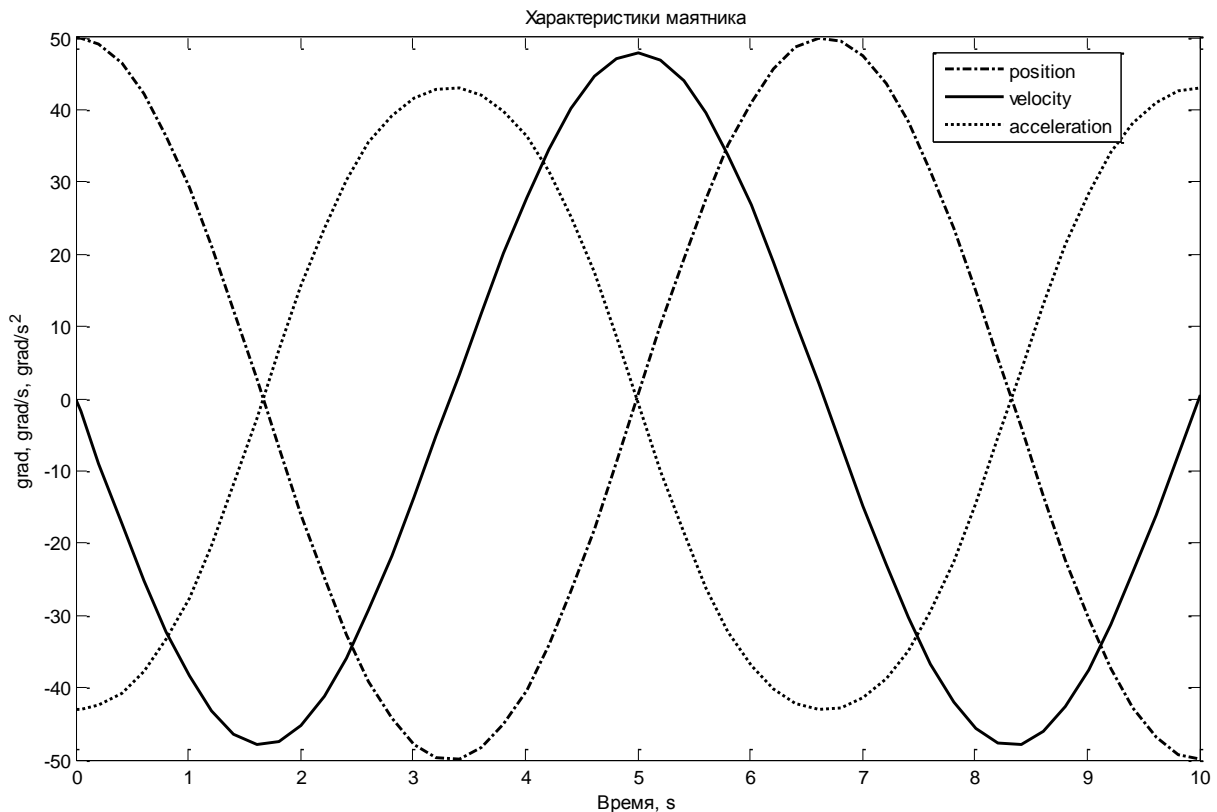


Рисунок 2.3 – Результаты работы - анимированная модель SimMechanics математического маятника



## Пример 2. Кривошипно-ползунный механизм

В качестве второго примера в разделе 2 предлагается рассмотреть кривошипно-ползунный механизм с управляющим воздействием.

На рисунке 2.5 показана кинематическая схема кривошипно-ползунного механизма, где звено 1 – кривошип  $OA$ , 2 – шатун  $AB$ , 3 – ползун  $B$ , 0 – стойка. При этом звенья 1 – 3 являются подвижными звеньями, а стойка 0 неподвижным звеном. Она представлена в составе кинематической схемы опорой и направляющей ползуна 3.

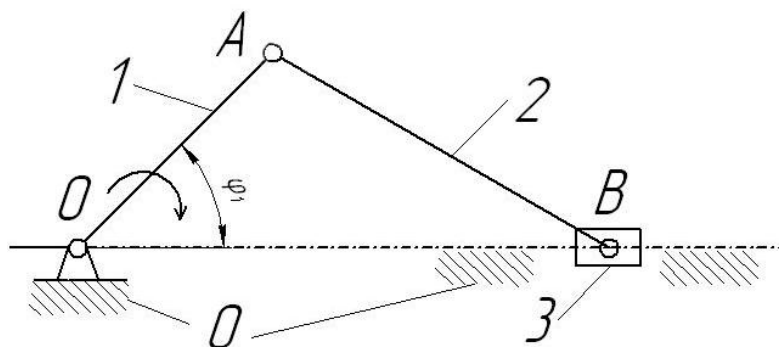


Рисунок 2.5 – Кинематическая схема кривошипно-ползунного механизма

Данный механизм относится к плоским механизмам, его число степеней свободы можно определить по формуле Чебышева. В таблице 2.2 проведён анализ кинематических пар механизма.



Таблица 2.2 – Кинематические пары

№	Кинематическая пара (КП)	Класс кинематической пары	Число степеней свободы
1	0 – 1	5 (вращательная)	1
2	1 – 2	5 (вращательная)	1
3	2 – 3	5 (вращательная)	1
4	3 – 0	5 (поступательная)	1

Для движения механизма необходимо отклонить кривошип на угол  $\varphi_1$ , то есть задать закон движения входного звена. Используя библиотеку Sensors&Actuators и возможности Simulink, можно создать кинематический привод. Для этого необходимо воспользоваться блоками Joint/Body Actuator (в зависимости от задачи) и задать три компоненты: положение, скорость и ускорение. На рисунке 2.6 представлена структурная модель SimMechanics кривошипно-ползунного механизма. В данном примере (рис. 2.6), угол задан воздействием Ramp, скорость и ускорение - блоком Constant, численные значения блоков приведены в приложении А2.

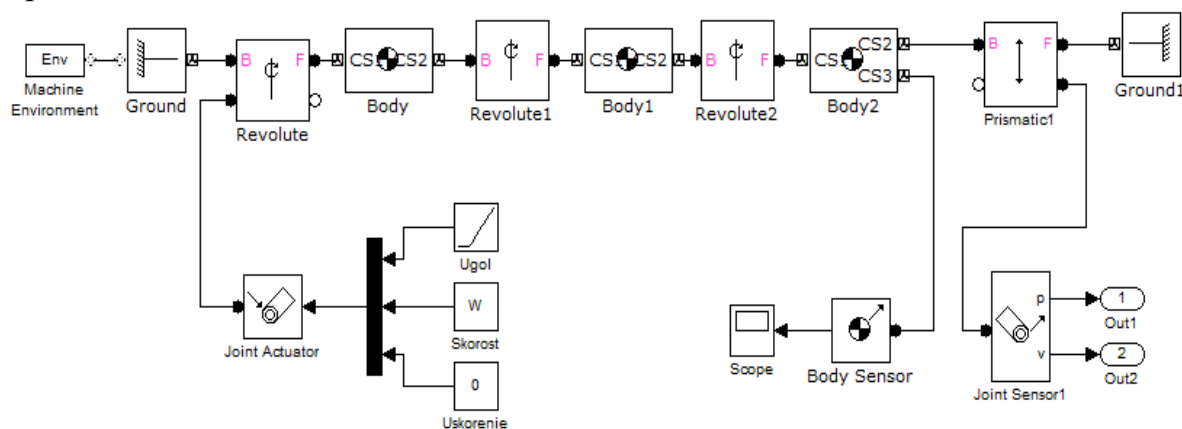


Рисунок 2.6 – Структурная модель SimMechanics кривошипно-ползунного механизма

1 – блоки Machine Environment, Ground, Ground1 задают гравитационные силы и стойку O; 2 – блоки Body, Body1, Body2 определяет геометрию звеньев кривошипно-ползунного механизма; блоки Revolute, Revolute1, Revolute2, Prismatic являются шарнирами - соединениями 5-го класса, они объединяют звенья между собой; 3 – Joint Actuator с группой вышеупомянутых блоков является кинематическим приводом; Joint Sensor, Out1, Out 2 – предназначены для получения выходных характеристик кривошипно-ползунного механизма.

На рисунке 2.7 показана анимированная модель SimMechanics кривошипно-ползунного механизма, в нулевом и произвольном

положении. Величина  $x$  наглядно демонстрирует перемещение ползуна, а угол  $\varphi_1$  – отклонение кривошипа.

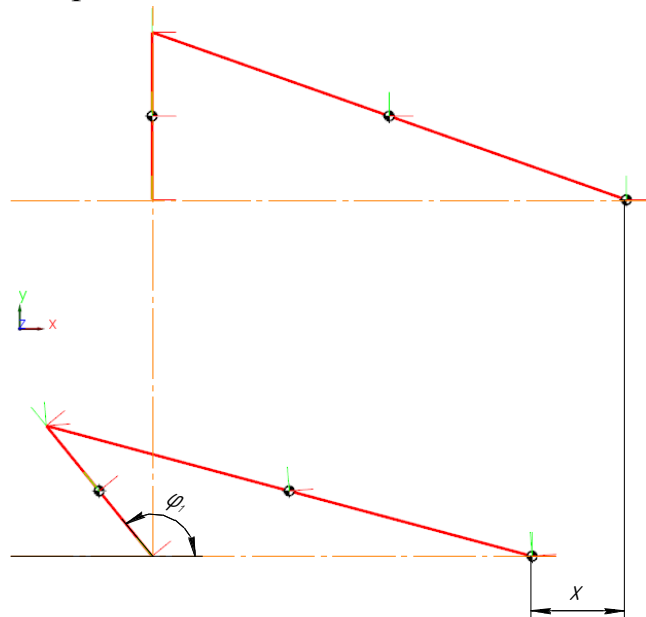


Рисунок 2.7 – Анимированная модель SimMechanics кривошипно-ползунного механизма.

На рисунке 2.8 показаны результаты работы модели SimMechanics кривошипно-ползунного механизма – график движения ползуна.

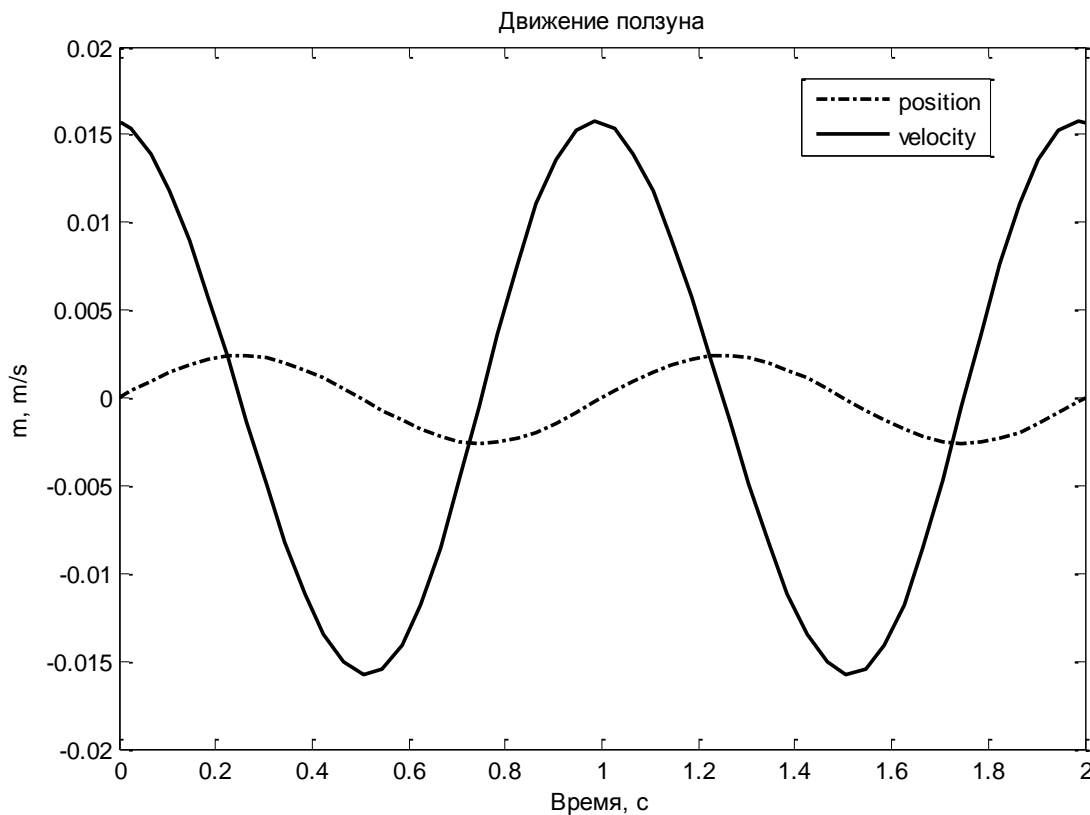


Рисунок 2.8 – Результаты работы модели SimMechanics кривошипно-ползунного механизма – график движения ползуна

### Пример 3. Механизмы с зубчатым зацеплением

В качестве третьего примера в разделе 2, предлагается рассмотреть моделирование механизма с зубчатым зацеплением.

На кинематической схеме (рис. 2.9) представлен двухступенчатый редуктор (упрощённо).

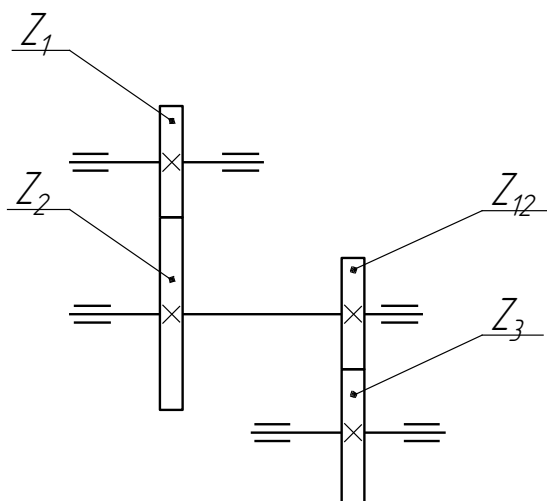


Рисунок 2.9 – Кинематическая схема двухступенчатого редуктора

Для проектирования зубчатого зацепления в SimMechanics необходимо рассчитать некоторые из основных геометрических параметров зубчатых колес. Подробное описание геометрии и принципов работы зубчатого зацепления представлено в источниках [X, X]. В таблице 2.3 приведены основные параметры, необходимые для построения зубчатого зацепления в структурной модели SimMechanics.

Таблица 2.3. Основные параметры необходимые для построения зубчатого зацепления в структурной модели SimMechanics

Число зубьев	$Z_1, Z_2, Z_{12}, Z_3$
$m$ – модуль расчетный	Стандартные значения модуля, мм Ряд 1: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5 Ряд 2: 0.35, 0.45, 0.55, 0.7, 0.9, 1.125, 1.375, 1.75, 2.25, 2.75
$i_{nk}$ – передаточное число зубчатой пары	$i_{nk} = \frac{Z_k}{Z_n}$
$d$ - диаметр делительной окружности зубчатого колеса	$d = \frac{m \cdot Z_n}{\cos(\beta)}$ $\beta$ - угол наклона зубьев для прямозубой передачи равен нулю
$a_\omega$ - межосевое расстояние	$a_\omega = (d_n + d_k) / 2$ или $a_\omega = (mZ_n + mZ_k) / 2$

На рисунке 2.10 представлена структурная модель SimMechanics последовательного зубчатого соединения.

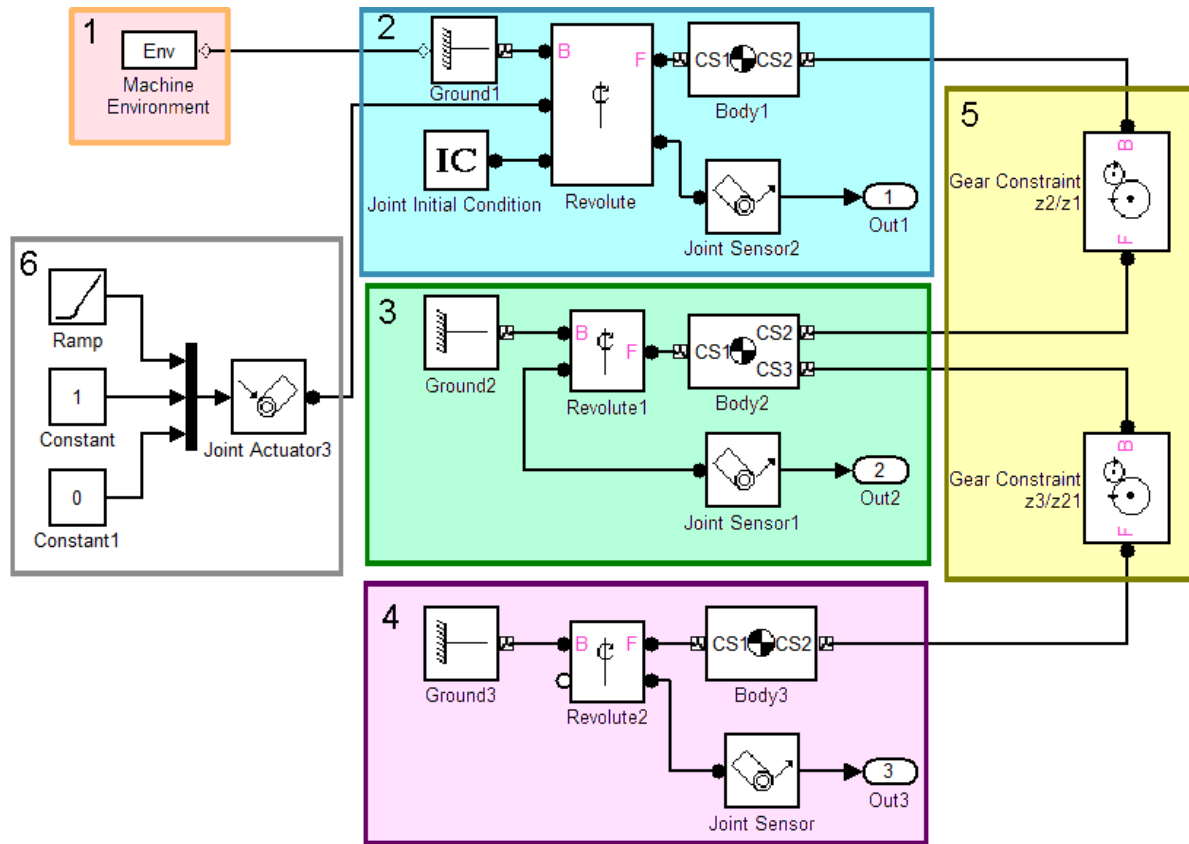


Рисунок 2.10 – Структурная модель SimMechanics последовательным зубчатого соединения

1 – блок Machine Environment задает гравитационные силы для модели; 2 – блоки Ground1, Revolute, Body1, Joint Sensor2, Out1, Joint Initial Condition формируют геометрию зубчатого колеса  $Z_1$ , обеспечивают вращательную степень свободы первого вала, задают начальные условия, формируют выходной сигнал; 3 – блоки Ground2, Revolute1, Body2, Joint Sensor1, Out2 формируют геометрию зубчатых колес  $Z_2$  и  $Z_{21}$ , обеспечивают вращательную степень свободы второго вала, формируют выходной сигнал; 4 – Ground3, Revolute2, Body3, Joint Sensor, Out3 формируют геометрию зубчатого колеса  $Z_3$ , обеспечивают вращательную степень свободы третьего вала, формируют выходной сигнал; 5 – блоки Gear Constraint  $z_2/z_1$  и Gear Constraint  $z_3/z_21$  моделируют зацепление зубьев в паре колёс с помощью передаточного отношения; 6 – Joint Actuator, Ramp, Constant, Constant1 имитируют идеальный двигатель.

Параметры и настройки каждого блока приведены в приложении Б3.

На рис. 2.11 представлена анимированная модель SimMechanics.

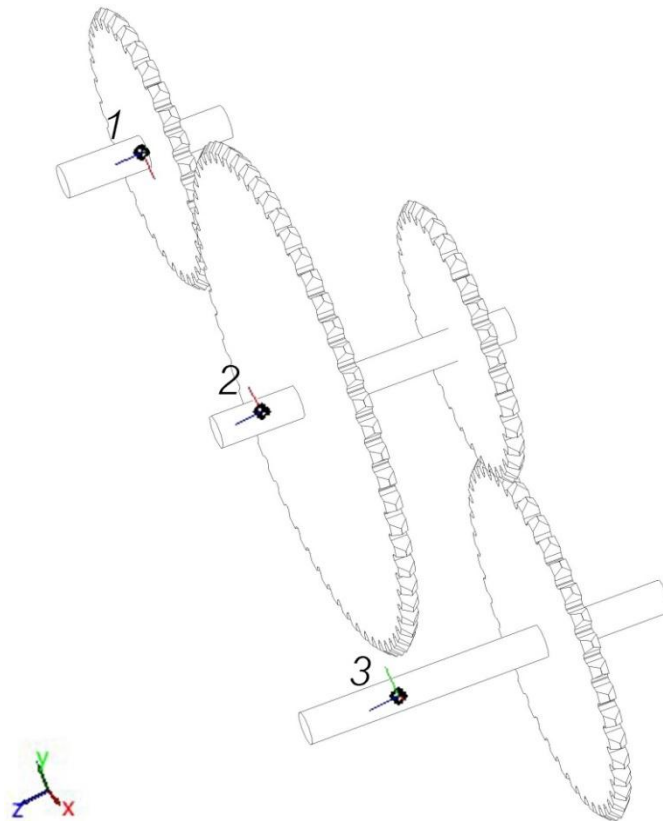


Рисунок 2.11 – Результаты работы анимированной модели зубчатого зацепления в SimMechanics. Для демонстрации модели SimMechanics используются 3D-модели зубчатых колес (модели импортированы из Pro Engineer в формате \*.stl), свойства всей системы сведены в три координатных центра (обозначены условно 1, 2, 3).

На рисунке 2.12 приведены результаты работы модели SimMechanics механизма с зубчатой передачей.

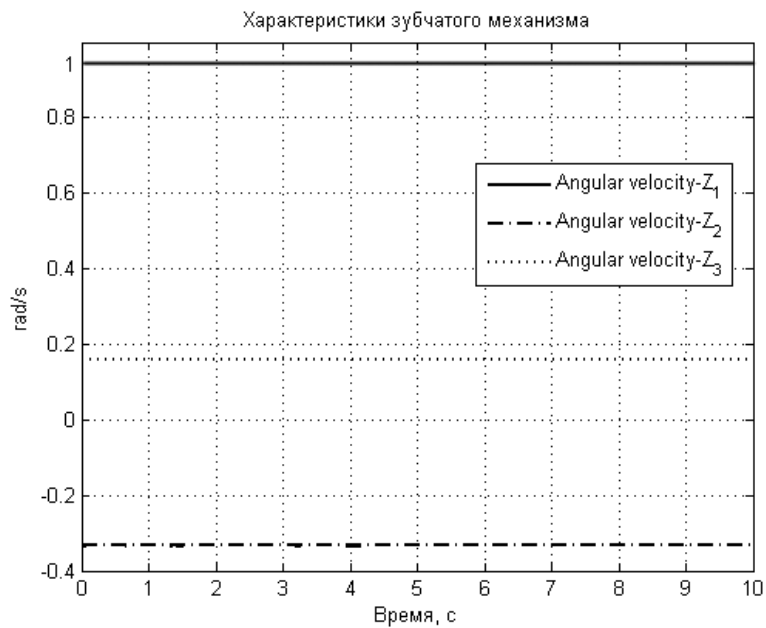


Рисунок 2.12 – Результаты работы модели SimMechanics механизма с зубчатой передачей.

#### Пример 4. Модель устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов

В четвертом примере в раздела 2 предложено создать модель устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов [18, 1]. Данная задача обобщает знания, полученные при ознакомлении с предыдущими примерами раздела.

В Санкт-Петербургском филиале ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) используют упругий торсионный подвес магниточувствительного элемента магнитостатического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1, его изготавливают из кевларовых нитей. Торсион (рис.2.14, (в)) представляет собой спирально-анизотропный стержень, выполненный в виде косы, сплетенной из кевларовых волокон. Плотность плетения – 7 узлов/мм. Огибающая поперечного сечения упругого торсионного подвеса представляет собой эллипс с большей осью, равной 0,046 мм, и меньшей осью – 0,033 мм; общая длина подвеса – 100 мм.

Торсионный подвес изготавливается с помощью прибора УИСАТ – устройства для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов (ЧЭ). Подвес изготавливается из трех прядей, в качестве материала для плетения используется особый материал – филаменты синтетических высокомодульных нитей (относятся к классу параарамидных волокон).

3D-модель и упрощенная схема УИСАТ приведена на рис. 2.13.

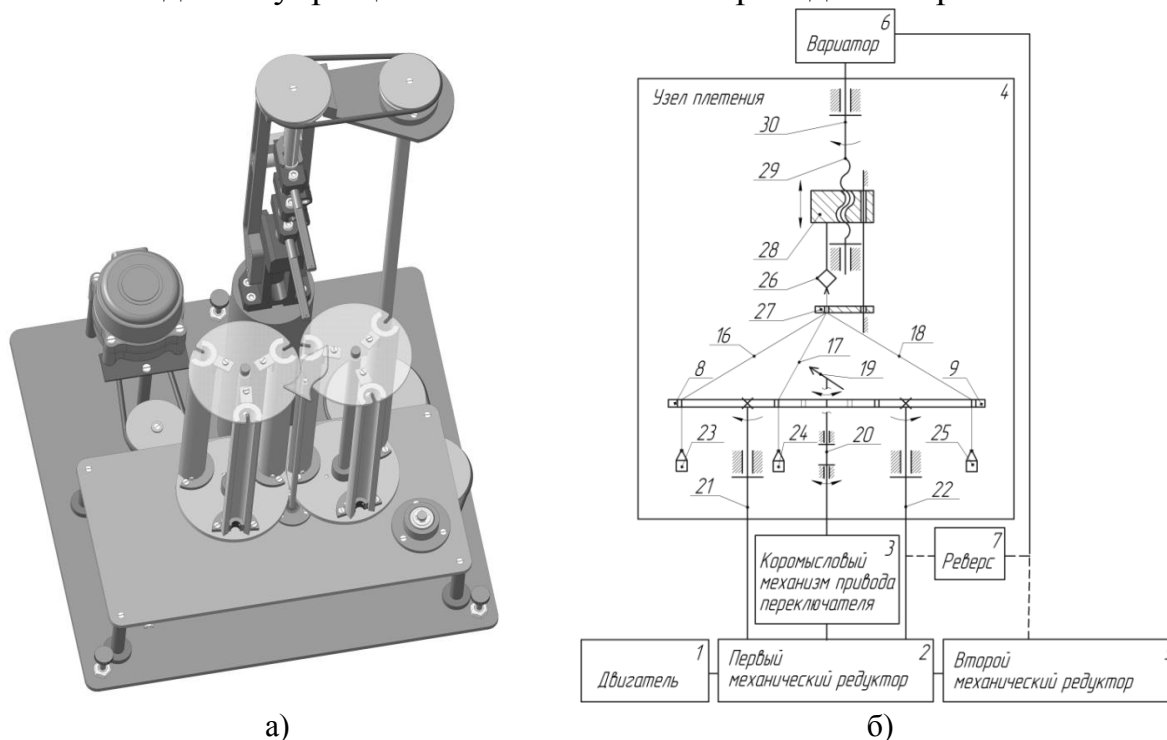


Рисунок 2.13– 3D-модель устройства УИСАТ (а) и его схема (б)

На рис. 2.14 приведена схема исполнительного механизма, схема одного цикла работы устройства и внешний вид получаемого торсионного подвеса.

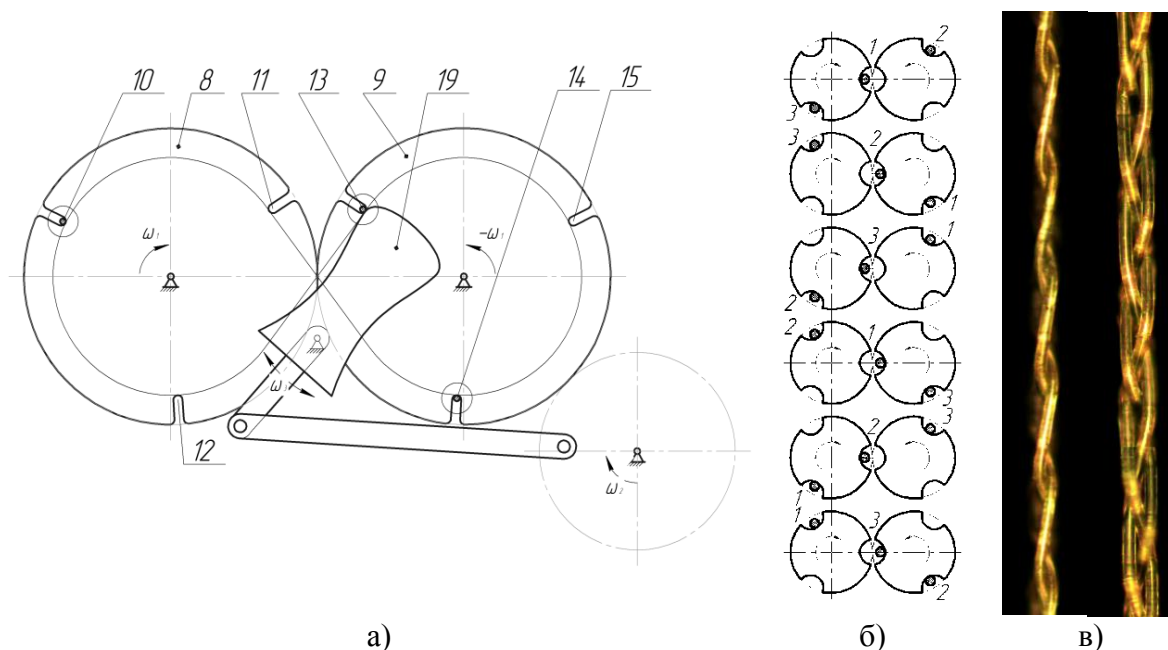


Рисунок 2.14 – Исполнительный механизм устройства УИСАТ (а), схема одного цикла работы (б) и торсион (вид сверху и сбоку) (в)

На рис. 2.13 (б): 1 – привод (двигатель); 2 – первый механический редуктор; 3 – коромысловый механизм привода переключателя; 4 – узел плетения (механизм подачи, плетения и сбора продукции); 5 – второй механический редуктор; 6 – вариатор; 7 – реверс.

В узле плетения 4 механизм плетения представлен (на рис. 2.14) следующими элементами: 8, 9 – диски, установленные в одной горизонтальной плоскости с возможностью вращения вокруг своих осей во взаимно встречном направлении; 10, 11, 12 – пазы на диске 8 для размещения сплетаемых прядей; 13, 14, 15 – пазы на диске 9 для размещения сплетаемых прядей; 16, 17, 18 – сплетаемые пряди; 19 – переключатель, расположенный между осями дисков 8 и 9, соединенный коромысловым механизмом с приводом и предназначенный для перемещения прядей 16, 17, 18; 20 – ось, передающая движение от коромыслового механизма переключателю (рис. 2); 21, 22 – валы, передающие движение от первого механического редуктора 2 дискам 8 и 9, соответственно.

Механизм подачи в узле плетения 4 представлен на рис. 2.13 в следующем виде: 23, 24, 25 – грузы, закрепленные на концах прядей и обеспечивающие постоянное натяжение в процессе плетения.

Механизм сбора в узле плетения 4 представлен на рис. 2.13 следующими элементами: 26 – захват, фиксирующий начала прядей и осуществляющий сбор готовой продукции по мере сплетения прядей; 27 -

направляющая с отверстием, стягивающим пряди и установленная с возможностью перемещения по высоте. 28 – гайка, на которой жестко закреплен захват 26, способная с помощью винта вертикально перемещаться вдоль оси винта относительно механизма плетения; 29 – винт, приводящий в движение гайку 28; 30 – вал, передающий движение от вариатора 6 винту 29.

Вариатор 6 выполнен в виде двух последовательно соединенных шкивов: ведущего трехступенчатого шкива, расположенного на выходном валу второго механического редуктора 5, и трехступенчатого шкива, установленного на оси винта 29, приводящего в движение гайку 28.

Реверс 7 выполнен в виде механического редуктора, состоящего из двух последовательно соединенных шкивов: ведущего, расположенного на валу 22, и ведомого, расположенного на выходном валу второго механического редуктора 5. В режиме плетения шкивы реверса 7 не работают (приводной ремень (пассик) снят) – реверс 7 отключен.

Первый механический редуктор 2 выполнен в виде механического редуктора, состоящего из шкивов и зубчатых колес.

Второй механический редуктор 5 выполнен в виде механического редуктора, состоящего из шкивов.

Принцип действия устройства состоит в следующем: осуществляют регулировку (настройку) в соответствии с заданными характеристиками торсионного подвеса. Далее захватом 26 фиксируют начала прядей 16, 17, 18, затем пряди пропускают через отверстие направляющей 27. Три сплетаемые пряди 16, 17 и 18 распределяют в пазах двух горизонтальных дисков 8 и 9 (две пряди в пазах одного диска, одна – в пазе другого). Обязательное условие размещения прядей состоит в том, что один из парных пазов должен быть свободен. Под парными пазами имеются ввиду пазы, работающие одновременно во время перемещения пряди из паза одного диска в паз противоположного диска. Далее, осуществляя механизм подачи, концы прядей 16, 17 и 18 фиксируют грузами 23, 24 и 25. Осуществляют включение. Привод 1 при помощи элементов первого механического редуктора 2 через валы 21 и 22 придает дискам 8 и 9 встречное вращение. Пряди 16, 17 и 18 перемещаются в свободные пазы противоположного диска при помощи переключателя 19, совершающего возвратно-вращательные движения относительно оси 20 согласованно с дисками 8 и 9, благодаря коромысловому механизму привода переключателя 3. Например, в выбранном случае прядь 17 из паза 13 диска 9 перемещается в паз 11 диска 8, прядь 16 из паза 10 диска 8 перемещается в паз 15 диска 9, прядь 18 из паза 14 диска 9 перемещается в паз 12 диска 8.

И этот процесс продолжают до верхнего (конечного) положения гайки 28. После завершения плетения готовое изделие извлекают из



устройства путем размыкания захвата и включают реверс 7 для возвращения механизма сбора в исходное положение.

Для исследования кинематики и динамики исполнительного механизма плетения осуществлено моделирование с помощью библиотеки SimMechanics пакета Simulink среды MATLAB.

На рис. 2.15 представлена кинематическая схема исполнительного механизма плетения.

Обозначения на рис. 2.15: 3, 4, 6, 7 – шкивы; 9, 10, 23 – зубчатые колеса;  $O_1A$  – кривошип;  $AB$  – шатун 24;  $BO_2$  – коромысло 25;  $O_2C$  – переключатель 27;  $\varphi_1 - \varphi_5$  – углы поворота звеньев. Для расчета углов поворота звеньев начало координат выбрано в точке  $O_1$ .

Для реализации модели необходимо рассчитать углы для задания первоначального положения механизма. Начало координат выбираем в точке  $O_1$ . Обозначения из рис. 2.15.

$$\bar{L}_{O_1A} + \bar{L}_{AB} = \bar{L}_{BO_2};$$

$$\varphi_1 = 0,$$

$$\begin{cases} l_{O_1A} + l_{AB} \cdot \cos \varphi_2 = x_{02} + l_{BO_2} \cdot \cos \varphi_3, \\ l_{AB} \cdot \sin \varphi_2 = y_{02} + l_{BO_2} \cdot \sin \varphi_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \cos^2 \varphi_2 = \left( \frac{x_{02} + l_{BO_2} \cdot \cos \varphi_3 - l_{O_1A}}{l_{AB}} \right)^2, \\ \sin^2 \varphi_2 = \left( \frac{y_{02} + l_{BO_2} \cdot \sin \varphi_3}{l_{AB}} \right)^2 \end{cases}$$

$$\varphi_3 = 2 \cdot \arctg \left( \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{C_1 - B_1} \right),$$

$$A_1 = 2 \cdot y_{02} \cdot l_{BO_2}$$

$$B_1 = 2 \cdot l_{BO_2} \cdot (x_{02} - l_{O_1A})$$

$$C_1 = x_{02}^2 + l_{O_1A}^2 + l_{BO_2}^2 + y_{02}^2 - l_{AB}^2 - 2 \cdot x_{02} \cdot l_{O_1A}$$

$$\varphi_2 = 2 \cdot \arctg \left( \frac{-A_2 + \sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}}{C_2 - B_2} \right),$$

$$A_2 = -2 \cdot y_{02} \cdot l_{AB}$$

$$B_2 = -2 \cdot l_{AB} \cdot (x_{02} - l_{O_1A})$$

$$C_2 = x_{02}^2 + l_{O_1A}^2 + l_{AB}^2 + y_{02}^2 - l_{BO_2}^2 - 2 \cdot x_{02} \cdot l_{O_1A}$$

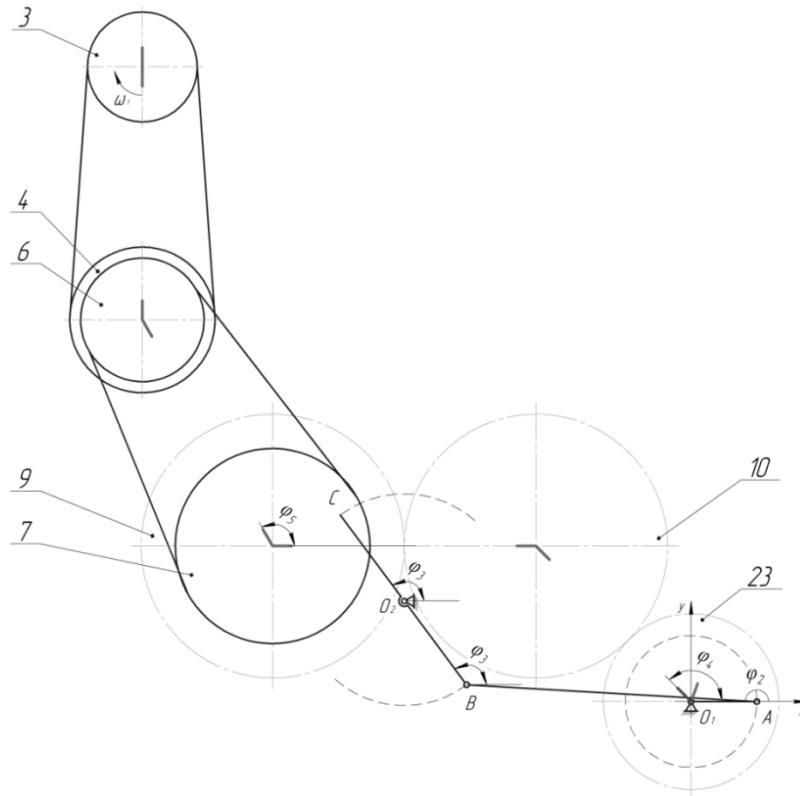


Рисунок 2.15 – Кинематическая схема исполнительного механизма плетения (вид сверху)

Также необходимо провести расчет нагрузки, приложенной к переключателю (момент силы), что поясняется рис. 2.16.

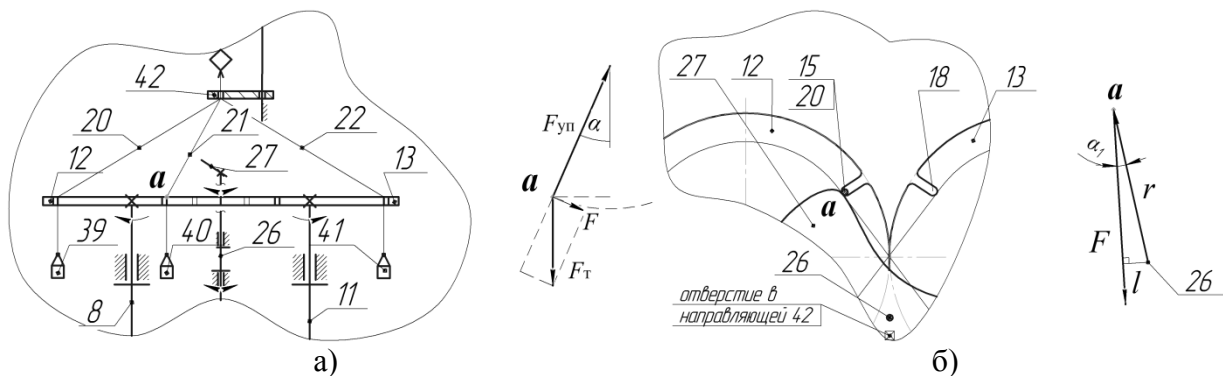


Рисунок 2.16 – Расчет нагрузки, приложенной к переключателю

$$|\vec{F}| = mg \cdot \sin \alpha; \quad \vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

$$M = F \cdot l = mg \cdot \sin \alpha \cdot r \cdot \sin \alpha_1.$$

Данный расчет был произведен при условии, что нить нерастяжима.

Данные, необходимые для моделирования работы исполнительного механизма плетения, представлены в приложении А4.

Используется модель, где  $O_1$  – звено для демонстрации кривошипа  $O_1A$ ; длины звеньев 8 и 11, ось 26 выбраны для демонстрации; длины

звеньев, отмеченные знаком «\*» – расстояние между двумя шарнирами. Масса звеньев рассчитана с помощью модели детали в программе Pro Engineer (анализ массовых характеристик). Для возможности моделирования в SimMechanics шкивы заменяются эквивалентными зубчатыми колесами (под эквивалентным понимается зубчатое колесо, обеспечивающее необходимую угловую скорость на валу).

Для демонстрации модели SimMechanics используются упрощенные 3D-модели некоторых звеньев (шкивы 3, 4, 6, 7; зубчатые колеса 9, 10, 23; диски 12 и 13; переключатель 27). Модели импортированы из Pro Engineer в формате \*.stl.

На рис. 2.17 представлена анимированная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения.

На рис. 2.19 представлена структурная модель SimMechanics (Simulink / MatLab), а на рис. 2.18 – результаты расчетов моделирования исполнительного механизма плетения с кинематическим приводом.

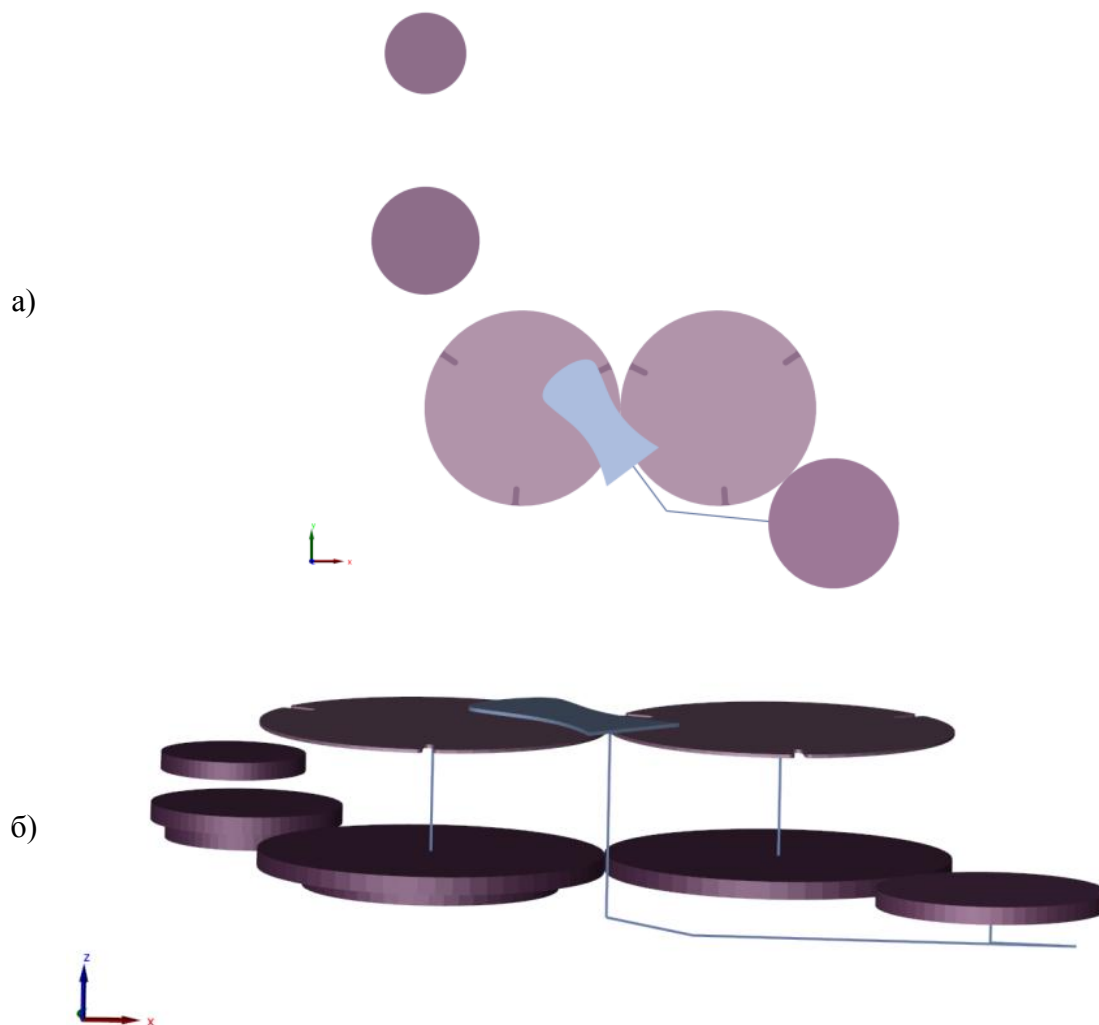


Рисунок 2.17 – Анимированная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения вид сверху (плоскость  $xy$ ) (а) и произвольный вид (б)

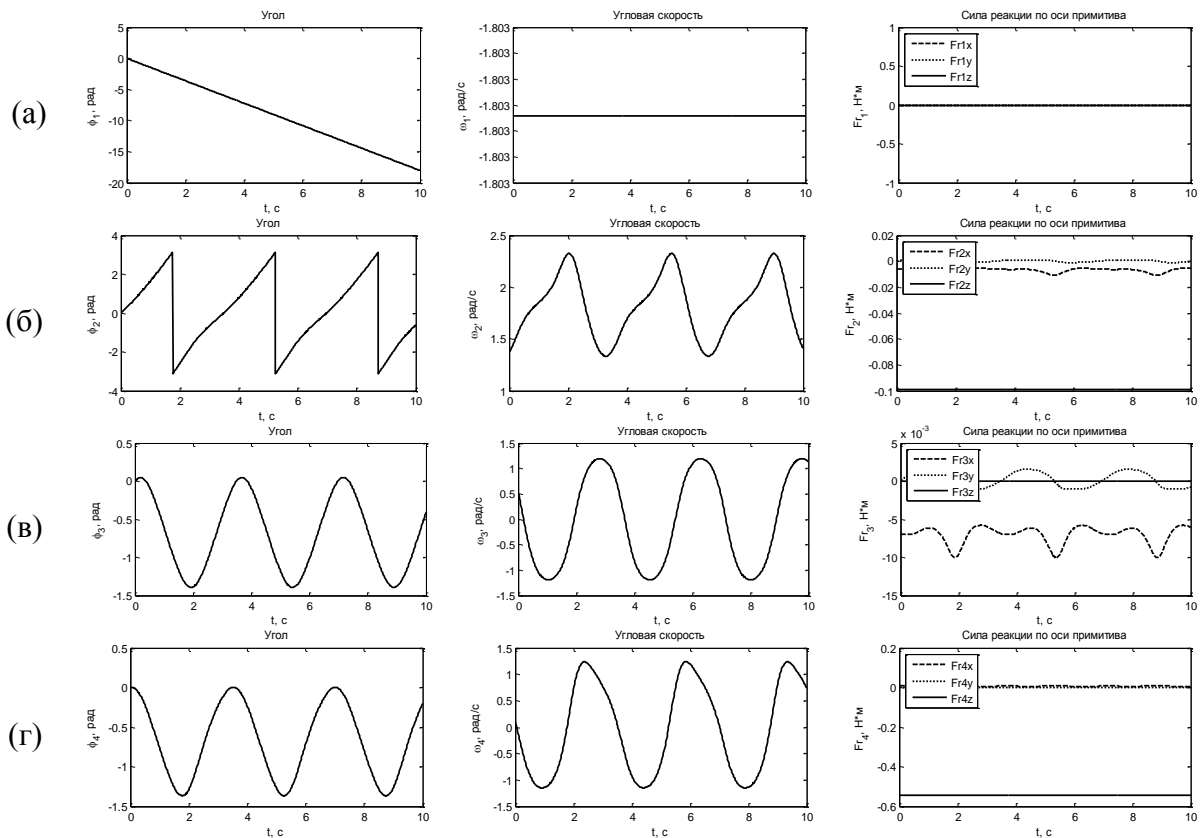


Рисунок 2.18 – Данные, поступившие с: (а) датчика 1 (кривошип  $O_1A$ ); (б) датчика 2 (шатун  $AB$ ); (в) датчика 3 (коромысло  $BO_2$ ); (г) датчика 4 (переключатель  $O_2C$ ) исполнительного механизма

По результатам расчетов моделирования исполнительного механизма плетения с кинематическим приводом, можно сказать, что получены основные законы изменения во времени угла, угловой скорости, силы реакции относительно примитива (по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). В пределах прикладываемых нагрузок механическая система работает стабильно.

На рис. 2.19: 1 – кинематический привод; 2 – нагрузка, приложенная к переключателю  $O_2C$ ; 3 – подсистема Sensor 1 (датчик 1); блоки подсистем Sensor 1 – 4 аналогичны блокам подсистемы Sensor 1 (датчик 1).

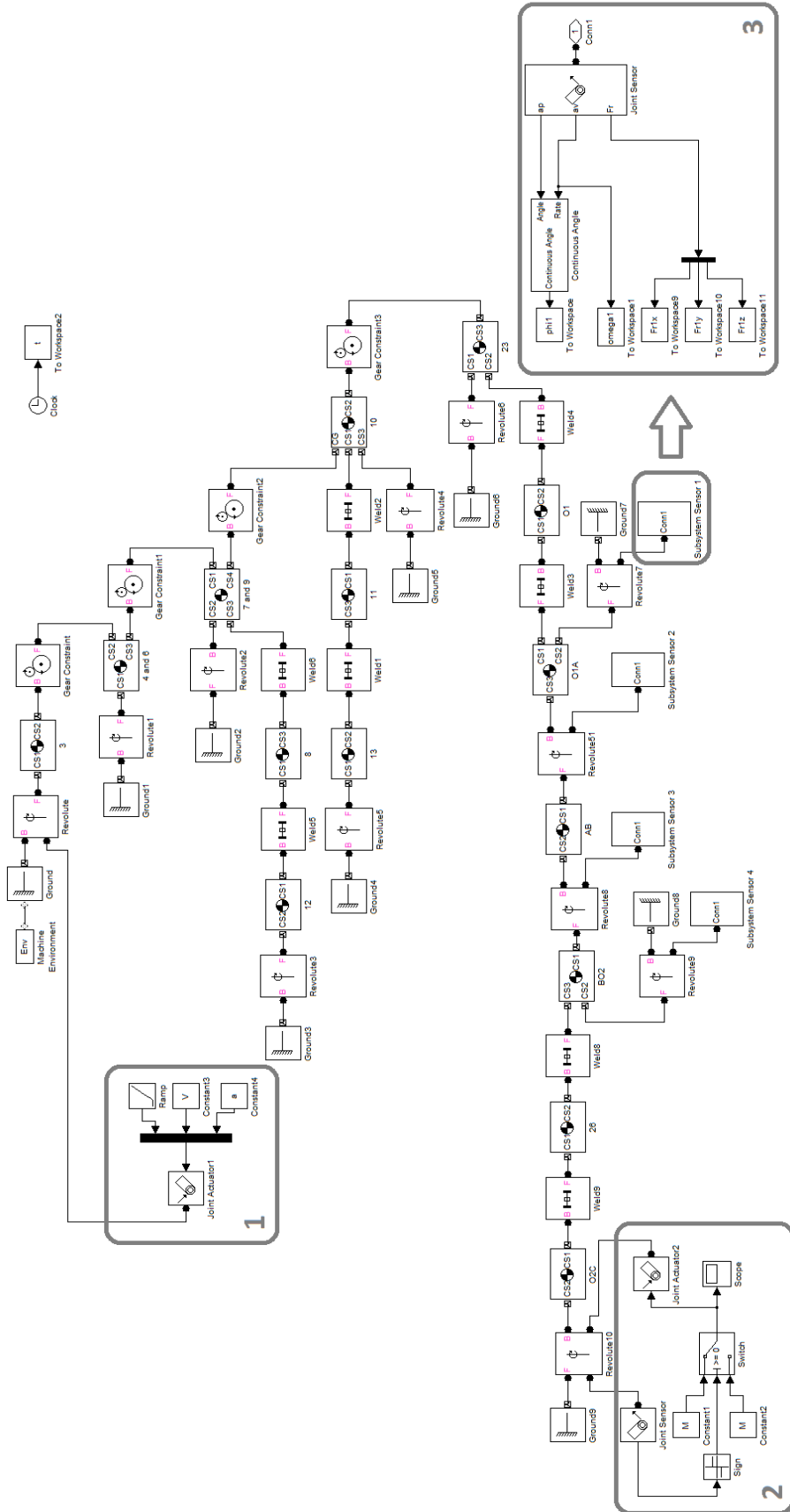


Рисунок 2.19 – Структурная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения

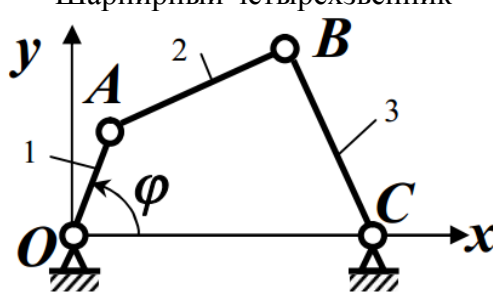
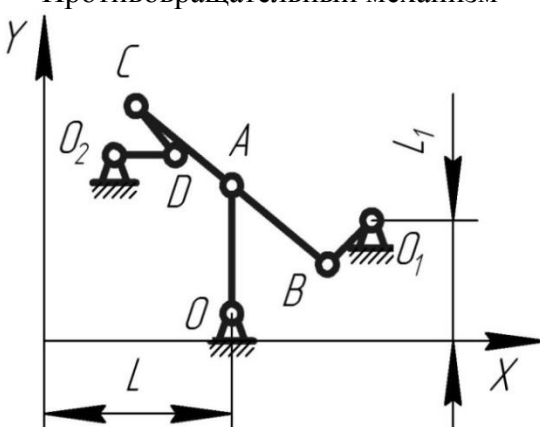
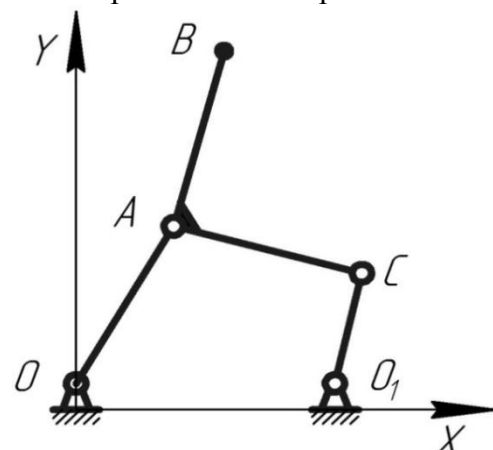
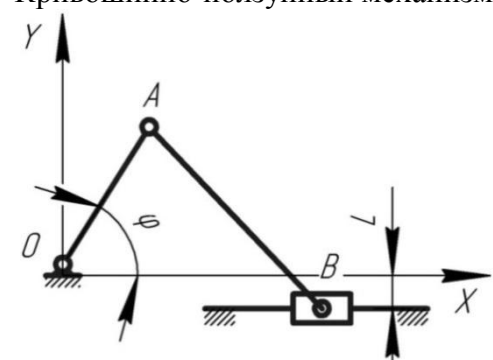
## Задачи для самостоятельной работы к разделу 2

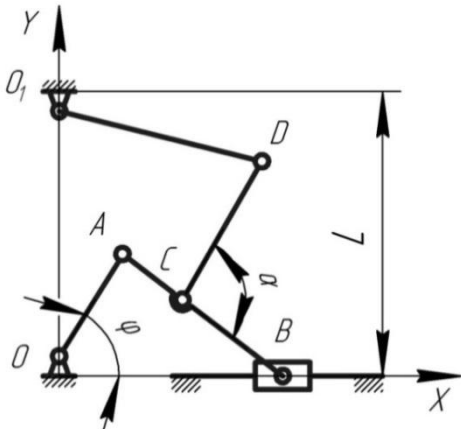
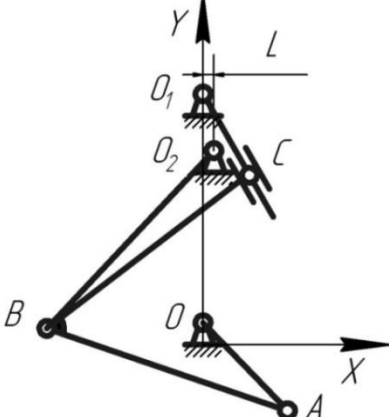
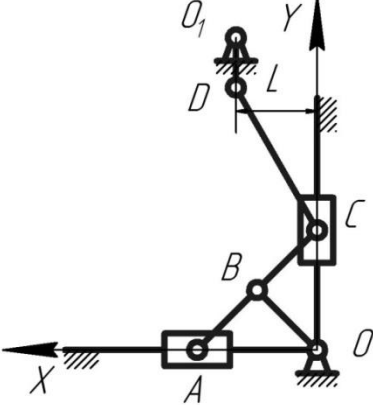
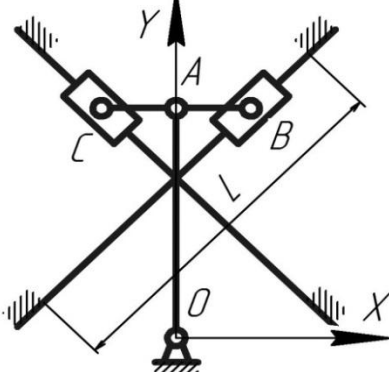
Необходимо выполнить следующие задание (см. Таблицу 2.4) [14]:

1. Провести кинематический анализ предложенного механизма.
2. Построить механизм, используя блоки SimMechanics и Simulink.
3. Создать управляющий файл.
4. Подключить кинематический привод к начальному звену или к другому элементу, по требованию преподавателя.
5. Исследовать движение механизма (подключить датчики, силы и др.), сделать вывод данных.
6. Подготовить отчёт.

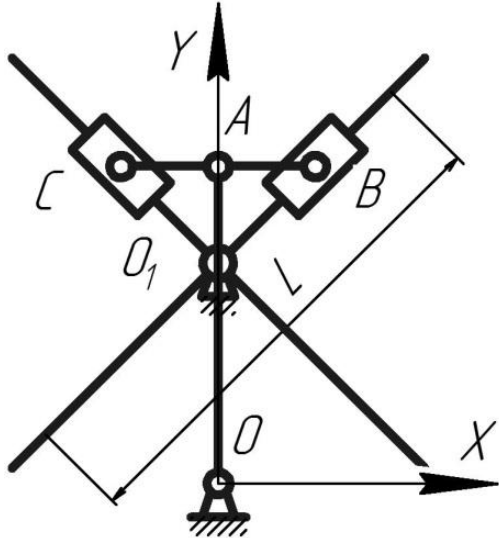
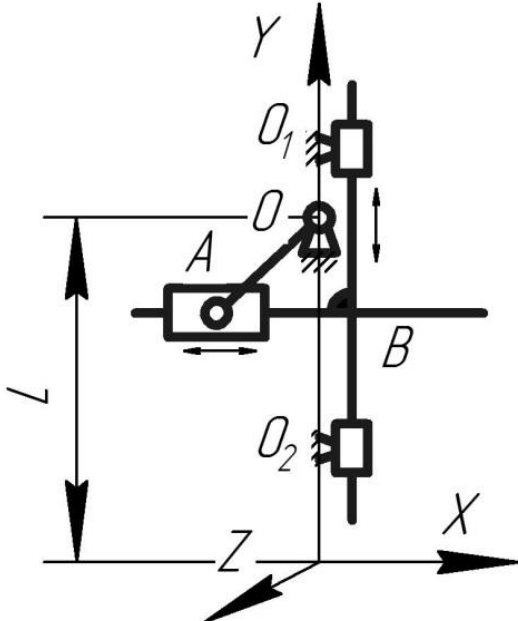
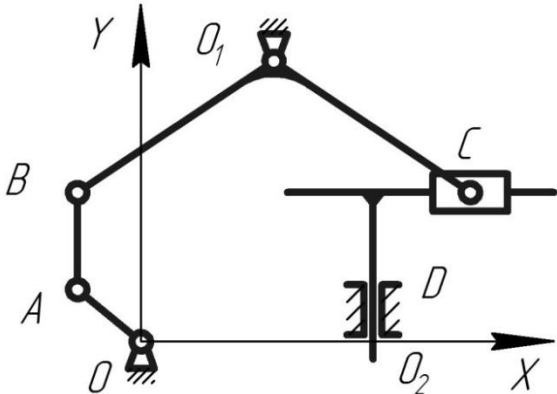
Таблица 2.4. Задачи для самостоятельной работы к разделу 2

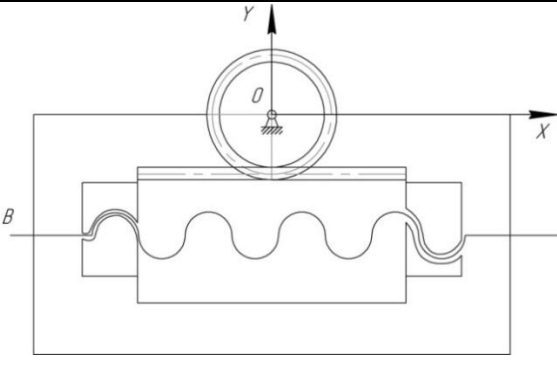
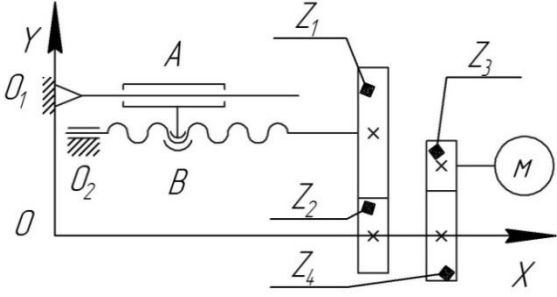
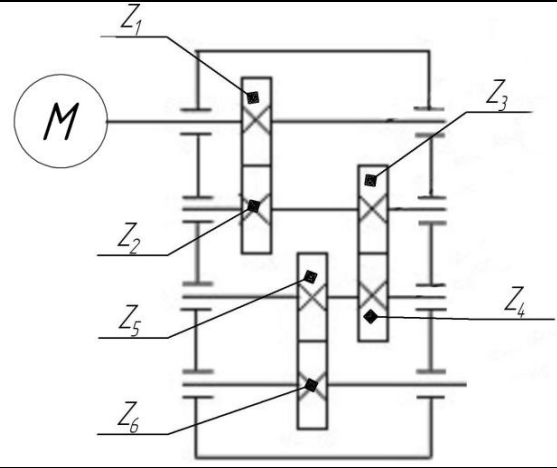
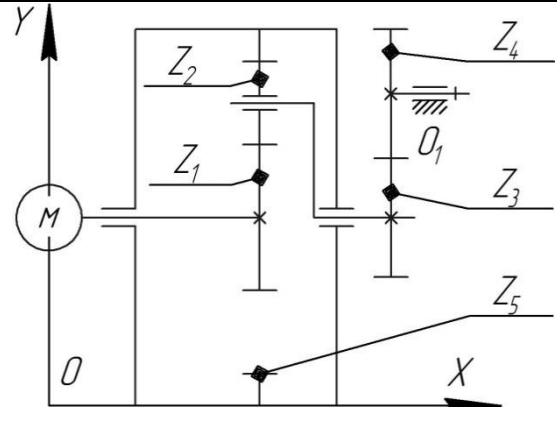
№	Схема	Исходные данные
1	2	3
1	<p style="text-align: center;">Двойной маятник</p>	$L_{OC} = 0.5 \text{ (m)}$ $L_{CA} = 0.3 \text{ (m)}$ $\varphi = 50^\circ$ $\beta = 15^\circ$ Материал всех звеньев: алюминий АД ГОСТ 4784-97
2	<p style="text-align: center;">Маятник на наклонном основании</p>	$L_{OB} = 0.5 \text{ (m)}$ $L_{OA} = 0.35 \text{ (m)}, L_{AC} = 0.4 \text{ (m)}$ $\varphi = 30^\circ, \alpha = 40^\circ$ Материал всех звеньев: алюминий АД ГОСТ 4784-97 Двигатель подключён к поступательно-вращательному шарниру А, перемещает звено АС по всей длине ОВ со скоростью 200 об/мин.
3	<p style="text-align: center;">Двойной маятник на наклонном основании</p>	$L_{OB} = 0.5 \text{ (m)}$ $L_{OA} = 0.35 \text{ (m)}$ $L_{AC} = 0.4 \text{ (m)}, L_{CD} = 0.2 \text{ (m)}$ $\alpha = 30^\circ, \varphi = 40^\circ, \beta = 25^\circ$ Материал всех звеньев: алюминий АД ГОСТ 4784-97 Двигатель подключён к поступательно-вращательному шарниру А, перемещает звено АС по всей длине ОВ со скоростью 400 об/мин.

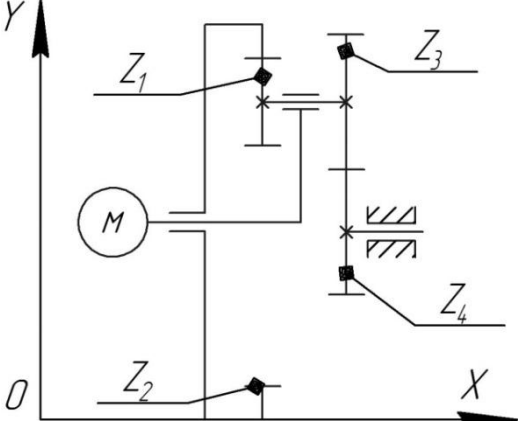
1	2	3
4	<p>Шарнирный четырёхзвенник</p> 	<p> <math>L_{OA} = 0.15 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.4 \text{ (m)}</math>  <math>L_{BC} = 0.5 \text{ (m)}, L_{OC} = 0.7 \text{ (m)}</math>  <math>\varphi = 40^\circ</math> </p> <p>Материал всех звеньев: алюминий АД ГОСТ 4784-97                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O, скорость 1000 об/мин.</p>
5	<p>Противовращательный механизм</p> 	<p> <math>L_{OA} = 0.1 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.1 \text{ (m)}</math>  <math>L_{BC} = 0.2 \text{ (m)}, L_{CD} = 0.05 \text{ (m)}</math>  <math>L_{DO_2} = 0.05 \text{ (m)}, L_{BO_1} = 0.05 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.16 \text{ (m)}, L_1 = 0.095 \text{ (m)}</math> </p> <p>Материал всех звеньев Сталь 25 ГОСТ 1050-88.                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O<sub>1</sub>, скорость 2000 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма, построить траектории движения шарниров C и D.</p>
6	<p>Приближенное прямоило</p> 	<p> <math>L_{OA} = 0.15 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.15 \text{ (m)}</math>  <math>L_{AC} = 0.15 \text{ (m)}, \angle BAC = 90^\circ</math>  <math>L_{CO_1} = 0.09 [0.05, 0.02] \text{ (m)}</math> </p> <p>Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88.                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O<sub>1</sub>, скорость 1500 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма, построить траектории движения шарнира B при различной величине звена CO<sub>1</sub>, сравнить результаты.</p>
7	<p>Кривошипно-ползунный механизм</p> 	<p> <math>L_{OA} = 0.2 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.5 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.1 \text{ (m)}, \varphi = 25^\circ</math> </p> <p>Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O, скорость 1500 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма, сравнить данные с результатом работы модели из примера №2.</p>

1	2	3
8	<p>Кривошипно-ползунный механизм</p> 	<p><math>L_{OA} = 0.13 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.2 \text{ (m)}</math>  <math>L_{AC} = 0.08 \text{ (m)}, L_{CD} = 0.175 \text{ (m)}</math>  <math>L_{DO_1} = 0.23 \text{ (m)}, L = 0.3 \text{ (m)}</math>  <math>\varphi = 58^\circ, \alpha = 97^\circ</math>                      Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O, скорость 1000 об/мин.                      Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма.</p>
9		<p><math>L_{OA} = 0.045 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.085 \text{ (m)}</math>  <math>L_{BC} = 0.085 \text{ (m)}, L_{BO_2} = 0.085 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.01 \text{ (m)}</math>                      Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O, скорость 1000 об/мин.                      Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма.</p>
10		<p><math>L_{OB} = 0.04 \text{ (m)}, L_{AC} = 0.08 \text{ (m)}</math>  <math>L_{CD} = 0.1 \text{ (m)}, L_{DO_1} = 0.025 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.01 \text{ (m)}, \angle BOC = 45^\circ</math>                      Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру O1, скорость 1000 об/мин.                      Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения звеньев механизма.</p>
11		<p><math>L_{OA} = 0.035 \text{ (m)}, L_{BC} = 0.06 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.15 \text{ (m)}</math>                      Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ 1050-88                      Направляющие ползунов расположены под углом <math>45^\circ</math>. Двигатель подключён к вращательному шарниру O, скорость 1500 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения поступательных пар механизма.</p>



1	2	3
12		<p> <math>L_{OA} = 0.035 \text{ (m)}, L_{BC} = 0.06 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.15 \text{ (m)}</math> </p> <p>                     Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Направляющие ползунов расположены под углом <math>45^\circ</math>. Двигатель подключён к вращательному шарниру <math>O</math>, скорость 1500 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения поступательных пар механизма и скорость вращения шарнира <math>O_1</math>.                 </p>
13		<p> <math>L_{OA} = 0.04 \text{ (m)}, L_{BC} = 0.06 \text{ (m)}</math>  <math>L = 0.15 \text{ (m)}</math> </p> <p>                     Материал всех звеньев: Сталь 35 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру <math>O</math>, скорость 1500 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения поступательных пар механизма и скорость вращения шарнира <math>O_1</math>.                 </p>
14		<p> <math>L_{OA} = 0.5 \text{ (m)}, L_{AB} = 0.6 \text{ (m)}</math>  <math>L_{BO_1} = 1.7 \text{ (m)}, L_{O_1C} = 1.7 \text{ (m)}</math>  <math>L_C = 2.1 \text{ (m)}</math> </p> <p>                     Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру <math>O</math>, скорость 10 об/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения пар <math>C, B</math>, построить их траектории движения.                 </p>

1	2	3
15		<p>Двигатель подключён к винту В, скорость 250 об/мин, он двигает каретку, которая входит в зубчатое зацепление.                      Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ 1050-88.                      Параметры механизма подобрать самостоятельно.</p>
16		<p>Двигатель М передаёт момент на зубчатый редуктор, скорость 2000 об/мин, далее на винт В. Передача винт-гайка преобразует вращательное движение в поступательное, ползун А перемещается вдоль оси <math>O_1X</math>.                      Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ1050-88.  <math>i_{12} = 5, i_{43} = 2, P = 1,0 \text{ мм}</math>                      Параметры механизма подобрать самостоятельно.</p>
17		<p>Двигатель М передаёт момент на зубчатый редуктор, скорость 3000 об/мин.                      Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ1050-88.  <math>i_{12} = 5, i_{34} = 4, i_{56} = 2</math>                      Параметры механизма подобрать самостоятельно.</p>
18		<p>Двигатель М передаёт момент на планетарный редуктор, скорость 5000 об/мин.                      Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ1050-88.                      Параметры механизма подобрать самостоятельно.</p>

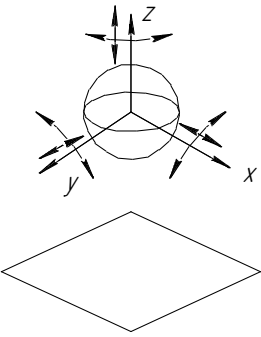
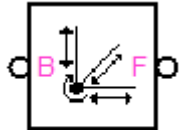
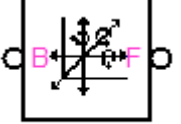
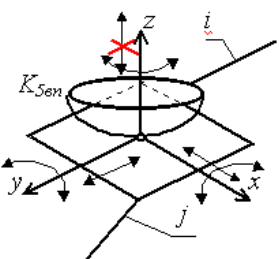
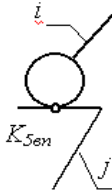


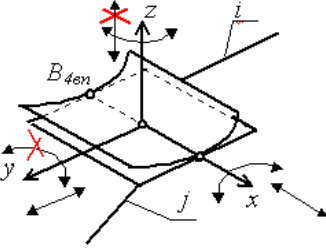
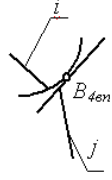


1	2	3
19		<p>Двигатель М передаёт момент на планетарный редуктор, скорость 6000 об/мин.  Материал всех звеньев: Сталь 45 ГОСТ1050-88.  Параметры механизма подобрать самостоятельно.</p>

### 3. Пространственные механизмы

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

В таблице 3.1 приведена классификация высших кинематических пар и соответствующие им блоки библиотеки SimMechanics [3].

Таблица 3.1. Классификация высших кинематических пар и соответствующие им блоки библиотеки SimMechanics

Вид кинематической пары	Число степеней свободы	Класс пары S	Обозначение на кинематических схемах.	Блоки библиотеки SimMechanics
			Пример использования	
	6	-	Отсутствует	 Six-DoF
			Свободное тело в трёхмерном пространстве	 Bushing Шесть степеней свободы
	5	1	 Шариковая ручка	 Custom Joint Позволяет добавлять от 1 до 6 степеней свободы
				
	4	2	 Ролик	 Custom Joint Позволяет добавлять от 1 до 6 степеней свободы
				

Число степеней свободы  $W$  пространственного механизма равно разности между общим числом координат подвижных звеньев и числом уравнений, связывающих эти координаты. Из определения следует:

$$W = 6 \cdot n - \sum_{i=1}^5 (6-i) \cdot p_i = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5) \quad (3.1)$$

Рекомендуемый алгоритм решения задач:

1. Провести кинематический анализ механизма, исследовать его структуру. Провести классификацию всех кинематических пар.
2. Определить число степеней свободы механизма.
3. Определить начальное и конечное звено.
4. Проанализировать закономерность движения механизма (построить траектории основных звеньев).
5. Создать управляющий «.m» файл. Описать физические свойства объектов моделирования (масса, плотность материалов элементов, длины, тензоры инерции и др.).
6. Создать «.mdl» модель.
7. Провести проверку работоспособности «.mdl» модели.
8. Провести анализ результатов моделирования, сравнить их с теоритическими данными.

### **Пример 1. Электромеханический модуль двухпараметрической антенны**

В качестве первого примера, в разделе 3 предлагается рассмотреть электромеханический модуль двухпараметрической антенны, который входит в состав бортовой радиолокационной станции [12].

На кинематической схеме (рис. 3.1) вращение отражателя относительно двух осей  $OY$  и  $OZ$  осуществляется через жесткую дугу. Она связана с отражателем через неподвижное кольцо, на котором установлены опоры скольжения, обеспечивающие подвижность отражателя вокруг оси  $OY$ . Для обеспечения подвижности системы вокруг оси  $OZ$  дугу устанавливают в подшипниковый узел, состоящий из четырех пар опор качения.

Передача вращательных движений от двигателей к отражателю производится через шатуны. Каждый шатун представляет собой систему рычагов, соединенных шарниром. Ведущий рычаг совмещен с двигателем и трансформатором в едином корпусе и на одном валу. Объединение перечисленных элементов в единый многофункциональный модуль позволяет исключить из системы паразитные передачи и дополнительные валы. Ведомые рычаги соединены с отражателем при помощи двусных карданов.

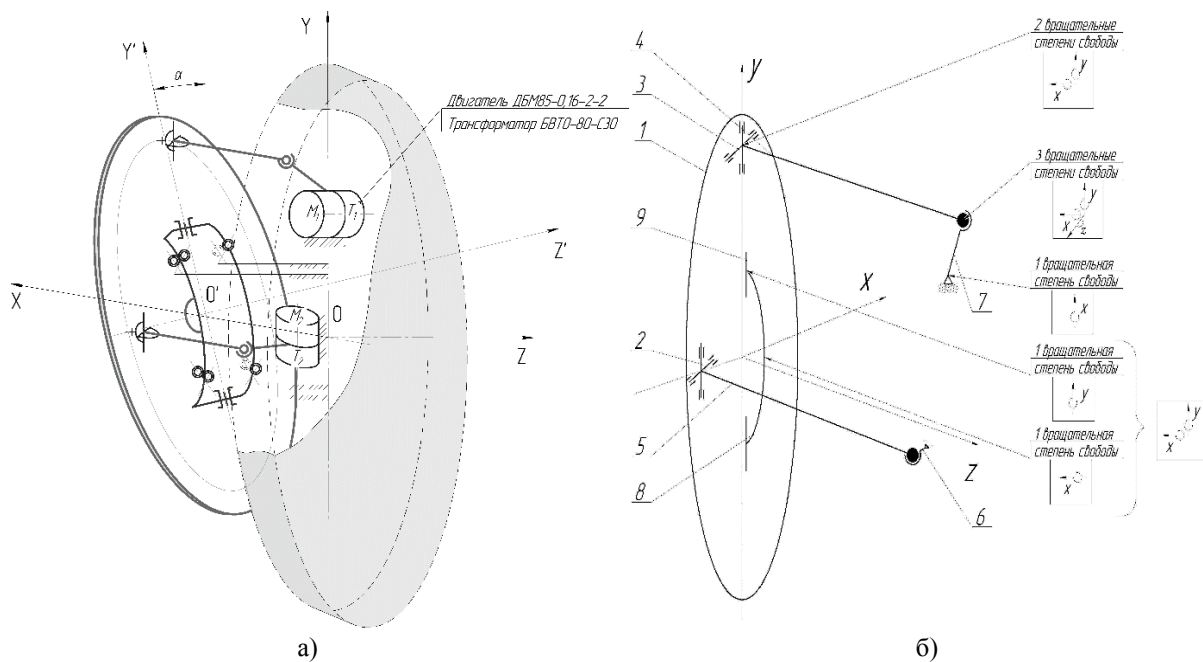


Рисунок 3.1 – Кинематическая схема двухпараметрической антенны  
1 – отражатель; 2, 3 – двуосные карданы; 4, 7 и 5, 6 – система рычагов, соединенных попарно сферическим шарниром; 4, 5 – тяги; 8 – опорная дуга; 9 – ось

Движение ведомого звена отражателя 1 (рис.3.1, б) представляет собой два вращательных движения: вокруг оси  $X$  – угломестная ось и оси  $Y$  – азимутальная. Движение реализуется за счет двух двуосных карданов 2, 3, они имеют две вращательные степени свободы относительно осей  $Y$  и  $X$ . Управляющее воздействие от двигателя к отражателю 1 передается через систему рычагов 4, 7 и 5, 6, соединенных попарно сферическим шарниром, который имеет 3 вращательные степени свободы. Карданы 3 и 4 обеспечивают степени свободы для движения тяг 4 и 5. Степени свободы для отражателя 1 обеспечиваются относительно оси  $Y$  осями 9, а относительно оси  $X$  – опорной дугой 8 (на рис. 3.1 изображена условно). При моделировании центральная развязка была преобразована в один блок с двумя соответствующими степенями свободы. Он был расположен в геометрическом центре отражателя 1.

Как объект механики, рассматриваемый прибор является представителем устройств с параллельной кинематикой, имеющим два однотипных (параллельных) рычажных привода. Устройство составлено из пяти звеньев (рис. 3.1, б), соединенных кинематическими парами, три из которых являются шарнирами: карданы (4 класса), два сферических шарнира (3 класса) и два плоских шарнира (5 класса). Такая структура механизма обеспечивает две независимые степени свободы (подвижности). Возвратно-вращательное движение подводится к кривошипам, расположенным вертикально и горизонтально. На рис. 3.2 показана структурная модель SimMechanics двухпараметрической антенны.

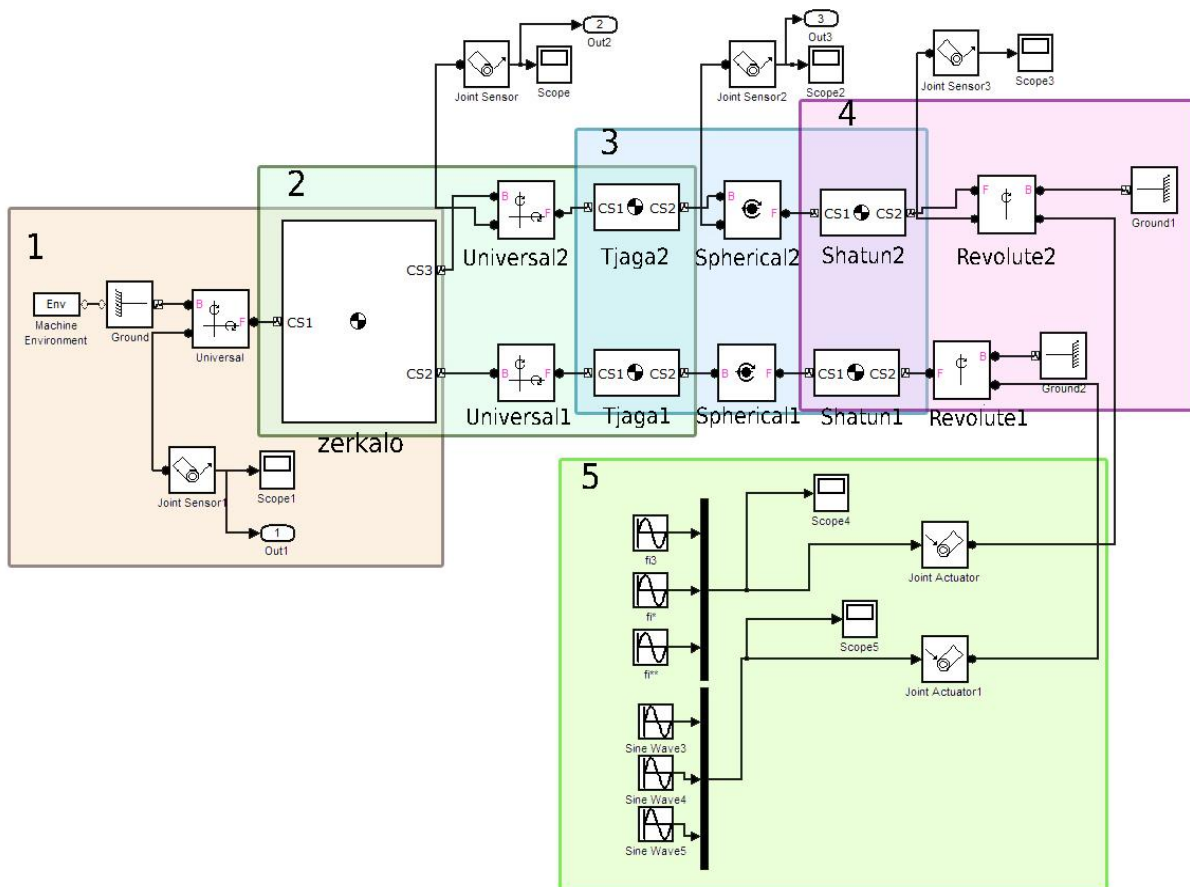
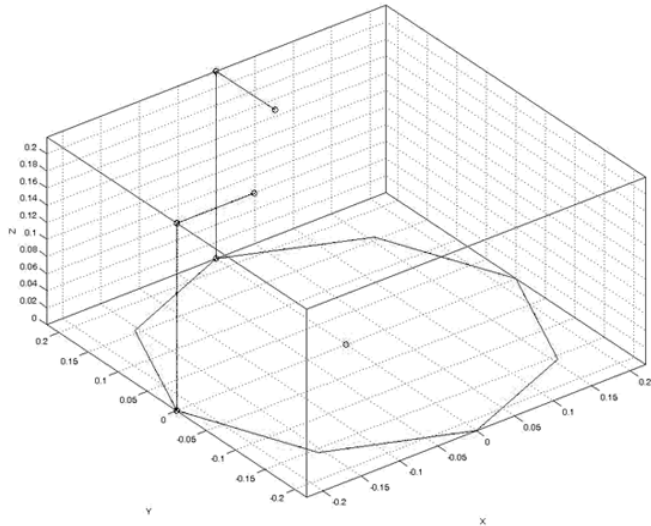
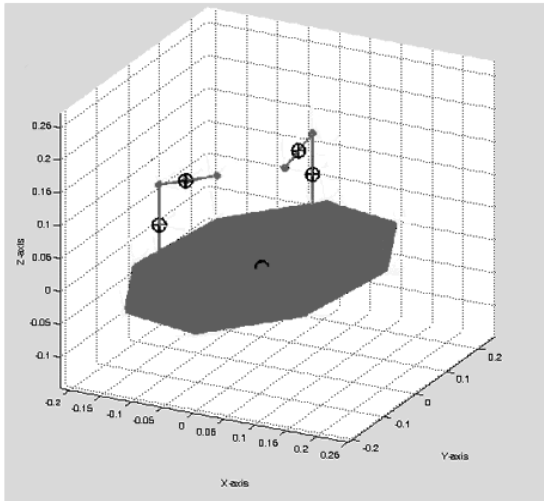


Рисунок 3.2 – Структурная модель SimMechanics двухпараметрической антенны

1 – блоки Machine Environment, Ground, Universal, Zerkalo3 – задает гравитационные силы, приложенные к центру координат, в котором расположен центр отражателя, а также формируют геометрию отражателя; 2 – блоки Zerkalo3, Universa2, Tjga1 – определяет положение тяги в координатной системе отражателя, их соединение с помощью двусосного кардана; 3 – блоки Tjga1, Spherical, Shatun1 – определяют положение шатуна относительно начала координат и его способ соединения с тягой; 4 – блоки Shatun1, Revolute, Ground1 – соединение шатуна с двигателем; 5 – блоки Joint Actuator, Sine Weve – имитация работы двигателя.

Параметры и настройки каждого блока приведены в приложении Б1. На рис. 3.3 а представлена анимированная модель SimMechanics двухпараметрической антенны. Использование в модели (рис. 3.2) блоков Joint Sensor позволяет измерить различные характеристики относительного движения частей механизма: угловые положения его элементов, угловую и линейную скорости, угловое ускорения, и другие параметры. Некоторые их них приведены в таблице 3.2.



а)

б)

Рисунок 3.3 – Результаты работы: а) анимированная модель SimMechanics , б) аналитическое решение

Таблица 3.2 Входные и выходные данные модели

<p>а) Угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение отражателя</p>	<p>б) Угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение тяги</p>
<p>в) Силы реакции опоры по трём осям для сферического шарнира</p>	<p>г) Закон движения двигателей</p>



## Пример 2. Моделирование робота-манипулятора с простейшим захватным механизмом

В качестве второго примера в разделе 3 предлагается рассмотреть моделирование робота-манипулятора с простейшим захватным механизмом [7].

На кинематической схеме (рис. 3.4) звенья 1-5 изображают робот-манипулятор, звенья 6-8 – захватный механизм. Звено 1 – стойка, представляющая собой направляющую, сонаправленную с осью  $Oz$ . Ползун (звено 2) может совершать движение вдоль направляющей 1 и вокруг нее (кинематическая пара 4-го класса). Звенья робота 2, 3, 4 и 5 соединены друг с другом вращательными парами 5-го класса. Захват робота состоит из основания 6 и двух губок 7 и 8, соединенных с основанием вращательными парами 5-го класса. Для одновременного движения при зажиме губки соединены друг с другом зубчатой передачей. Таким образом, приводя в движения одну губку, вторая двигается навстречу первой на тот же угол. Захват присоединен к роботу-манипулятору с помощью вращательной пары 5-го класса, позволяющей совершать вращение вокруг оси, проходящей через звено DE.

Система имеет 7 степеней свободы, для ее управления необходимо использовать 7 приводов.

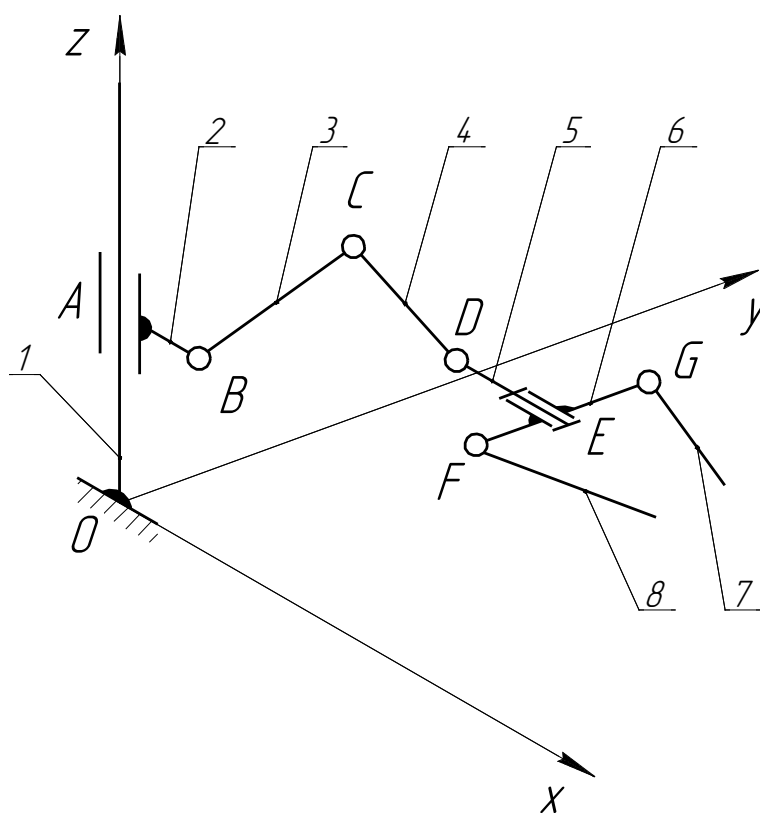


Рисунок 3.4 – Кинематическая схема робота-манипулятора с захватом  
1 – стойка (закрепленная направляющая); 2 – ползун; 3, 4 и 5 – звенья робота, соединенные между собой шарнирами; 6 – основание захвата; 7, 8 – губки захвата

На рис. 3.5 представлена анимированная модель в SimMechanics робота с захватом.

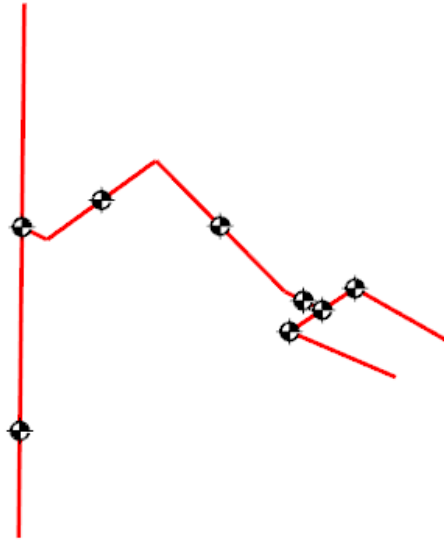


Рисунок 3.5 – Анимированная модель SimMechanics робота-манипулятора с захватом

На рис. 3.6 представлена модель SimMechanics робота с захватом, а на рис. 3.7 – результаты работы модели в виде движений точки захвата.

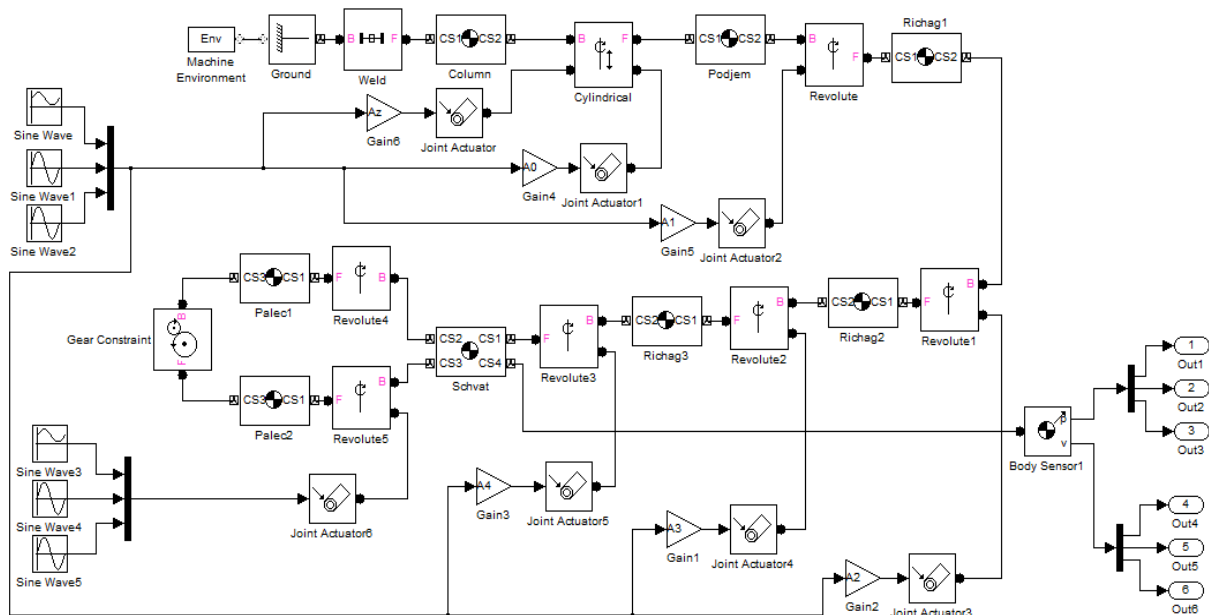


Рисунок 3.6 – Модель SimMechanics робота с захватом

1 – блоки Machine Environment, Ground – задают гравитационные силы и стойку; 2 – блоки Column, Podjem, Richag1-3 – определяет геометрию звеньев робота, блок Weld задает неразъемное соединение направляющей со стойкой, Cylindrical – соединение 4-го класса с поступательным и вращательным движением, Revolute, Revolute1,2 – соединения 5-го класса, объединяющие звенья робота между собой; 3 – блоки Schvat, Palec1,2 моделируют звенья захвата, Revolute4,5 – соединяющие их шарниры 5-го

класса, Gear Constraint – дополнительная передача между губками захвата, Revolute3 – шарнир, соединяющий захват с роботом; 4 – блоки привода звеньев робота, где SinWave, SinWave1,2– синусоидальный закон движения, передаваемый на двигатели Joint Actuator, Joint Actuator1-5 с разными коэффициентами Gain1-6; 5 – блок привода губок захвата, где SinWave3-5 – синусоидальный закон движения, передаваемый на двигатель Joint Actuator6.

Параметры и настройки каждого блока приведены в приложении Б2.

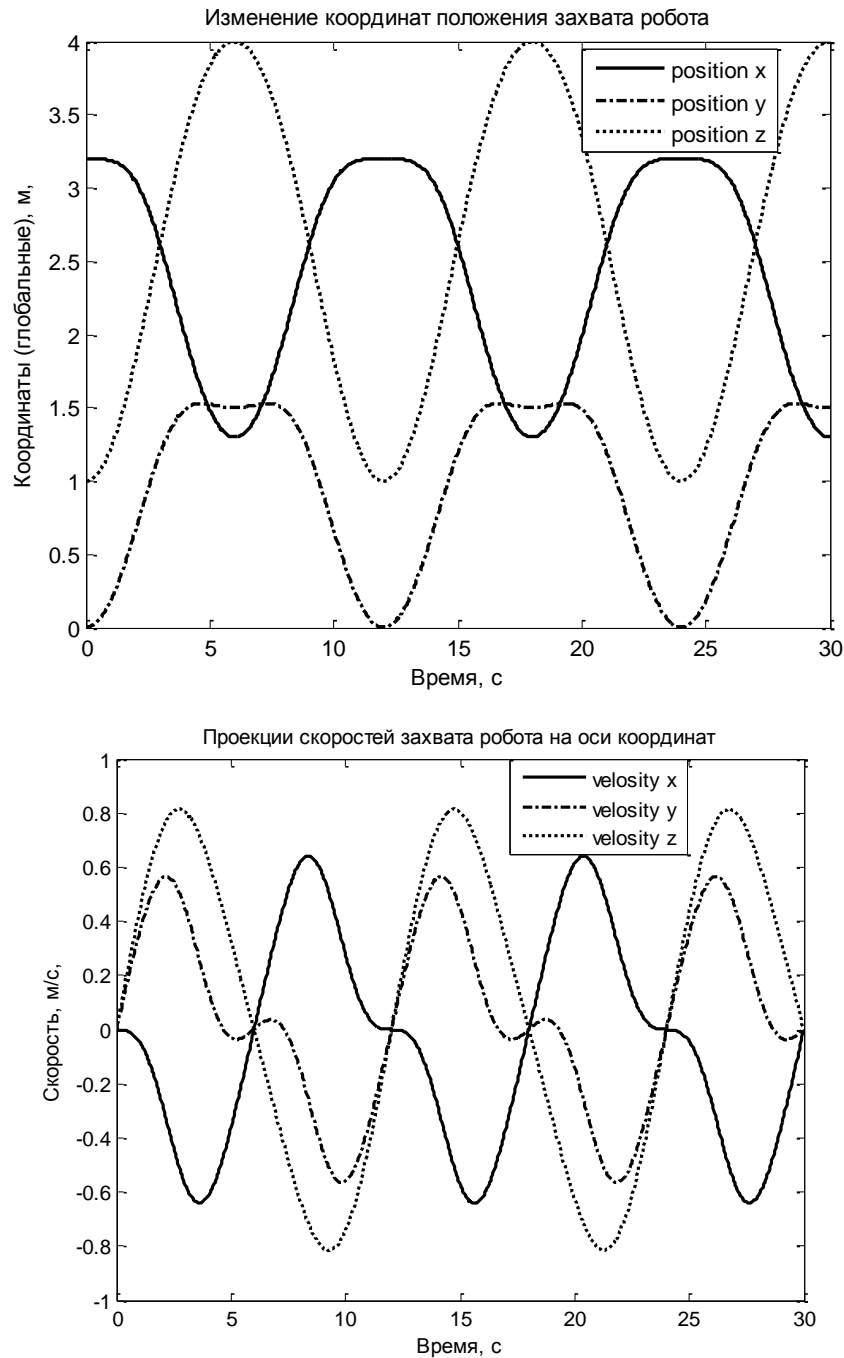


Рисунок 3.7 – Результаты работы модели SimMechanics робота-манипулятора с захватом – движение захвата

### Пример 3. Узел для полировки оптических стёкол

Далее, предлагается проанализировать узел механизма для полировки оптических стёкол. Существующее в настоящее время оборудование для обработки оптических элементов разнообразно и модернизировано на всех этапах технологического процесса. Однако, на заключительной стадии в настоящее время часто применяется метод свободного притира. Он позволяет добиться наилучшего совпадения формы реальной поверхности с расчётной. При изготовлении оптических линз используют различные марки материалов, в том числе кварц, кремний, и др. В результате обработки оптических элементов достигаются высокие значения чистоты поверхности, вплоть до 13-14 классов шероховатости. Изготавливаемые оптические элементы находят своё применение во многих областях машиностроения [13].

Работа механизма с течением времени приводит к смещениям пары инструмент – заготовка, это может быть следствием неудовлетворительного качества поверхности, ускорить износ инструмента и др. Поэтому, необходимо проводить анализ динамики системы с учётом её упруго-диссипативных сил, строить аналитические модели, имитирующие основные принципы работы ответственных узлов.

На рисунке 3.8, а представлены изображения цехового оборудования.

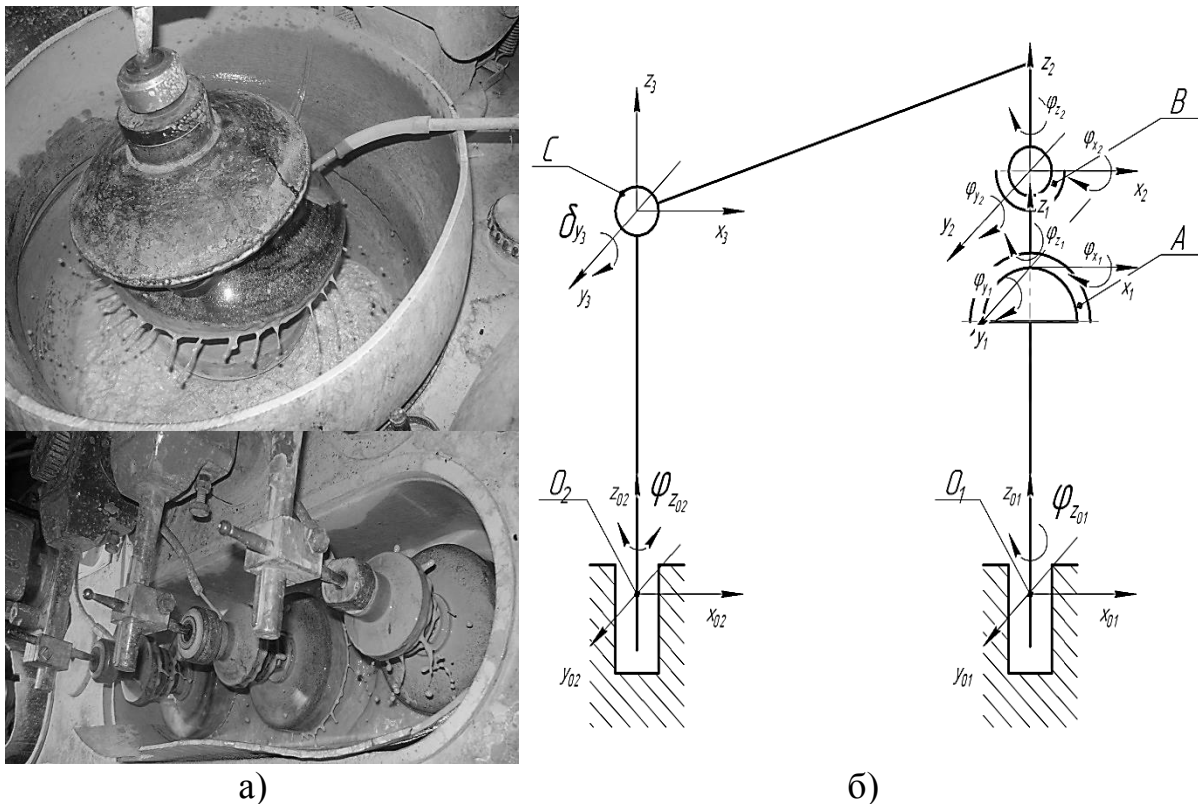


Рисунок 3.8 –Цеховое оборудование для полировки оптических стёкол методом свободного притира(а); кинематическая схема узла полировки оптических стёкол (б)

Управляющий двигатель механизма передаёт вращательный момент на звено  $O_1A$ , обеспечивая необходимый закон движения заготовки. Верхняя планшайба (полировальник), звено АВ и полирующая эмульсия (паста) осуществляют поэтапный процесс обработки стекла. Их совместное движение обусловлено силами смешанного трения и управляющим воздействием от второго двигателя. Для обеспечения стабильности работы механизма и управления силой трения применяется силовое замыкание звеньев. Вал 2 передает вращательное движение от стойки  $O_2$  рис. 3.8, образуя одну кинематическую пару пятого класса и сообщая механизму заданное вращение вокруг оси  $z_{02}$ ,  $\varphi_{z_{02}}$ . Вал с шатуном образуют вторую кинематическую пару пятого класса С, которая позволяет механизму совершать вращение вокруг оси  $y_3$ ,  $\delta_{y_3}$ . Шатун с полировальником образуют третью кинематическую пару третьего класса В, которая позволяет механизму совершать вращения вокруг осей  $x_2, y_2, z_2$ ;  $\varphi_{x_2}, \varphi_{y_2}, \varphi_{z_2}$ . Благодаря шаровому шарниру В, внутренняя поверхность инструмента самоустанавливается на поверхности заготовки. Полировальник образует с заготовкой четвертую кинематическую пару третьего класса А, которая позволяет механизму совершать вращения вокруг осей  $x_1, y_1, z_1$ ;  $\varphi_{x_1}, \varphi_{y_1}, \varphi_{z_1}$ . Заготовка жёстко закреплена на нижней планшайбе, которая, в свою очередь, неподвижно зафиксирована на валу 1. Вал 1 передаёт вращательное движение от стойки  $O_1$  и образует одну кинематическую пару пятого класса с условной стойкой  $O_1$ , сообщая механизму заданное вращение вокруг оси  $z_{01}$ ,  $\varphi_{z_{01}}$ . В кинематических парах А и В постоянный контакт обеспечивается силовым замыканием. Таким образом, обеспечивается сложное относительное движение инструмента по поверхности заготовки.

Следует отметить, что управляющее воздействие на звено  $O_1A$  в данной схеме рассматривается как возвратно-вращательное движение вокруг оси  $z_{02}$ . Будем считать входными звеньями валы 1 и 2, а звеном выхода – полировальный инструмент. Механизм, кинематическая схема которого представлена на рисунке 3.8 обладает тремя степенями свободы. Для анализа, механическую часть удобно рассматривать как систему с голономными, стационарными, удерживающими идеальными связями.

На рис. 3.9 представлена анимированная модель в SimMechanics узла механизма для полировки оптических стёкол. Для обеспечения взаимодействия инструмента и заготовки в модели SimMechanics необходимо описать законы действующих сил и ввести их в модель. Это необходимо, т.к. силы трения, в отличие от гравитационной силы, не описываются по умолчанию блоками библиотеки SimMechanics. Однако, отсутствие силы трения приводит к неработоспособности модели данного

механизма. На рис. 3.9, б) подробно представлена схема подмодели трения. В общем случае, модель сил может быть любая, а модель трения построена по требуемому закону. Однако, передача воздействий и получение откликов подсистемы осуществляется через блоки Joint Actuator и Joint Sensor.

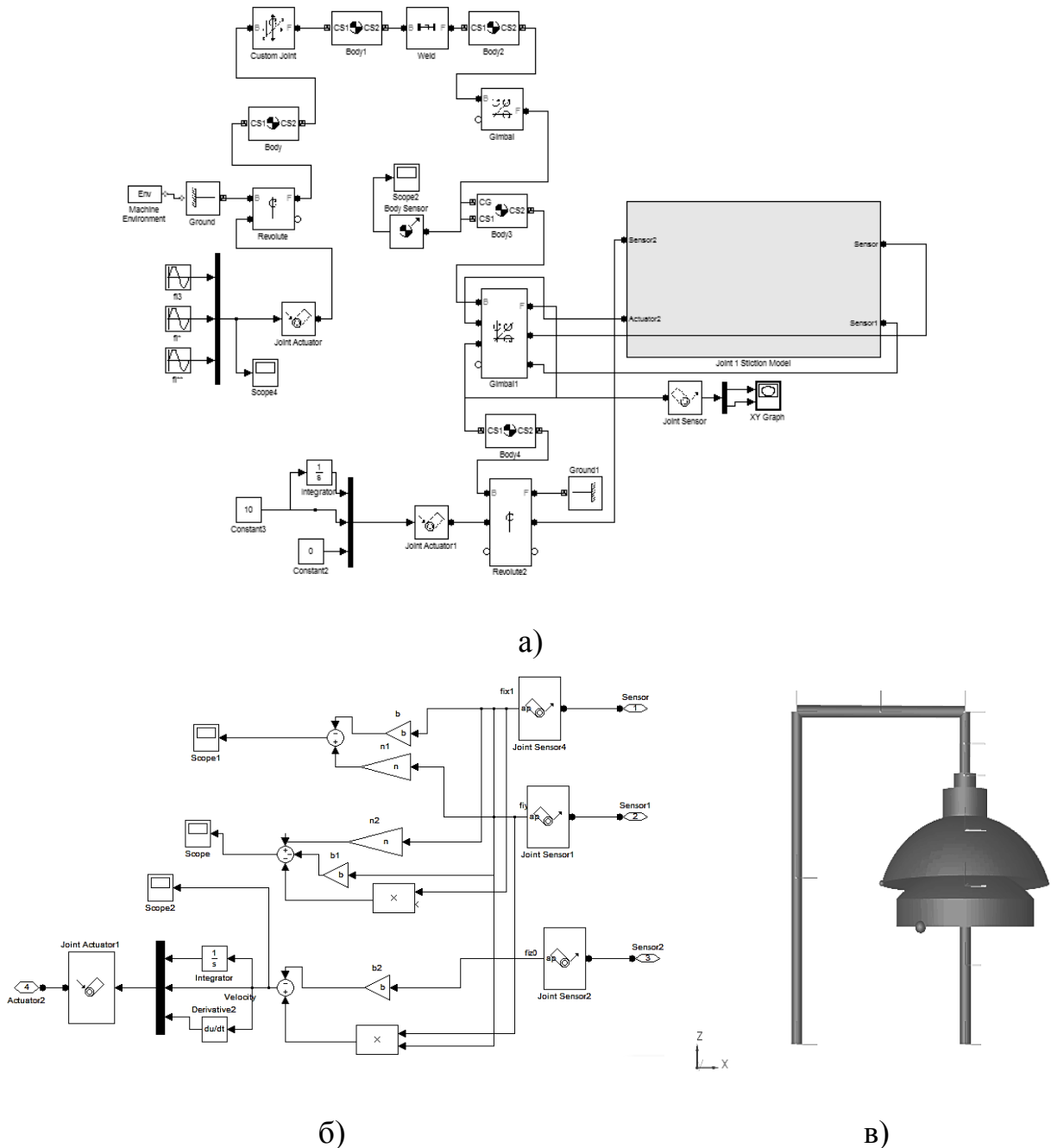


Рисунок 3.9 – Модель SimMechanics исполнительного механизма для обработки оптических элементов; а) модель механической части системы, б) схема блока трения, в) визуализация модели SimMechanics исполнительного механизма для обработки оптических элементов

1 – блоки Machine Environment, Ground задают гравитационные силы и стойку; 2 – блок, определяющий геометрию звеньев робота, 3 – блоки Joint Actuator и Joint Actuator1 – блоки привода звеньев, где Joint Actuator – создаёт синусоидальный закон движения, передаваемый на верхнюю планшайбу, Joint Actuator1 передает аналогичный закон на нижнюю планшайбу; 4 – подсистема, моделирующая силу трения пары инструмент – заготовка.

Результаты работы модели SimMechanics исполнительного механизма для обработки оптических элементов приведены в таблице 3.3.

Параметры и настройки каждого блока приведены в приложении Б3.

Таблица 3.3 Результаты работы модели SimMechanics исполнительного механизма для обработки оптических элементов

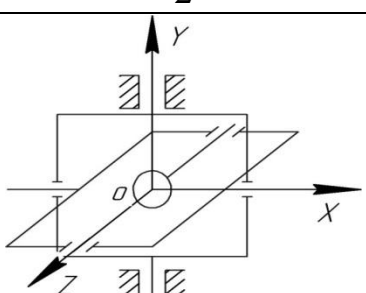
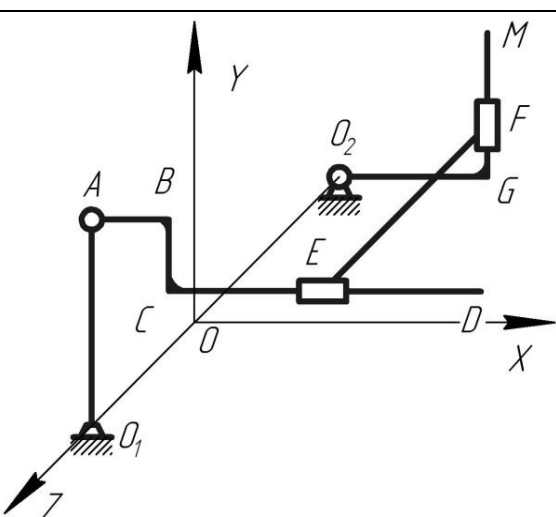
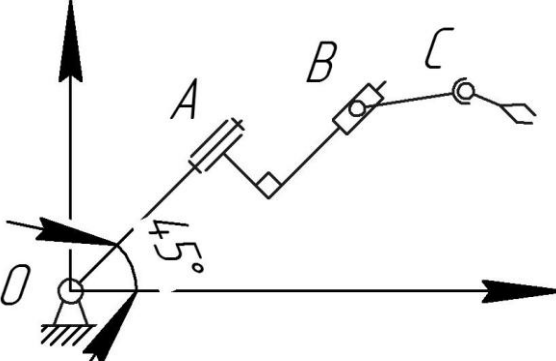
№	n,c,t	Сигнал по оси Y	Сигнал выхода по оси X
1	c=1 b=0.1 t=25		
2	c=1 b=1 t=25		
3	c=1 b=2 t=25		

### Задачи для самостоятельной работы к разделу 3

Во всех вариантах необходимо выполнить следующие задачи (см. Таблицу 3.4) [16]:

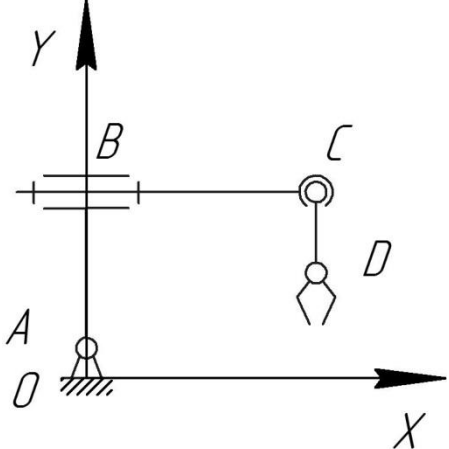
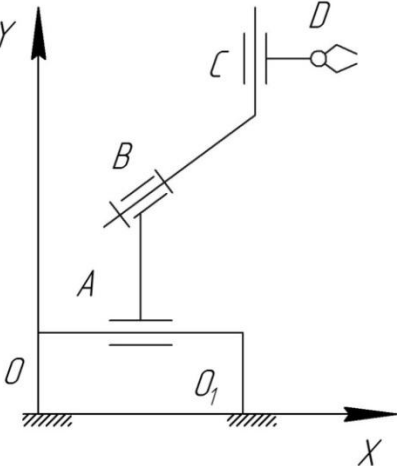
1. Провести кинематический анализ предложенного механизма
2. Построить механизм, используя блоки SimMechanics и Simulink.
3. Создать управляющий файл.
4. Подключить простейший двигатель к начальному звену или другому элементу, по требованию преподавателя.
5. Исследовать движение механизма (подключить датчики, силы и др.), сделать вывод данных.
6. Подготовить отчёт.

Таблица 3.4. Задачи для самостоятельной работы к разделу 3

№	Схема	Исходные данные
1	2	3
1		<p>Создать модель гироскопа. Провести анализ изменения угловой скорости и ускорения системы относительно трёх угловых координат <math>\varphi, \phi, \gamma</math>.</p>
2		<p><math>L_{O_1A} = 0.1</math> (m), <math>L_{AB} = 0.035</math> (m)  <math>L_{BC} = 0.04</math> (m), <math>L_{CD} = 0.09</math> (m),  <math>L_{EF} = L_{O_1O_2} = 0.09</math> (m),  <math>L_{O_2G} = 0.07</math> (m), <math>L_{GM} = 0.18</math> (m),                      Материал всех звеньев: Сталь 35 ГОСТ 1050-88                      Двигатель подключён к вращательному шарниру А, скорость 1500 оборот/мин. Вычислить угловые координаты, скорости и ускорения поступательных звеньев механизма.</p>
3		<p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88                      Ведущий двигатель подключён к вращательному шарниру О, скорость 1500 оборот/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену.</p>



Продолжение таблицы 3.4

1	2	3
4		<p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к вращательному шарниру А, скорость 1000 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену, таким образом, чтобы движение рабочего звена имело составляющую относительно трёх координат.</p>
5		<p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к вращательному шарниру А, скорость 1500 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену, таким образом, чтобы движение рабочего звена имело составляющую относительно трёх координат.</p>
6		<p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к направляющей А, скорость 500 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену, таким образом, чтобы движение рабочего звена имело составляющую относительно трёх координат.</p>
7		<p><math>L=200</math> (мм).</p> <p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к направляющей А, скорость 500 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену.</p>

1	2	3
8		<p><math>L=120</math> (мм).</p> <p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к направляющей <math>O_1</math>, скорость 400 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену.</p>
9		<p>Создать модель манипулятора. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущий двигатель подключён к направляющей <math>O_1</math>, скорость 1000 обор/мин. Параметры системы подобрать самостоятельно. Подключить подыгрывающие двигатели к каждому звену.</p>
10		<p>Создать модель робота-паука. Плоскость <math>A_1A_2A_3</math> является стойкой. Плоскость <math>C_1C_2C_3</math> должна быть параллельна плоскости <math>A_1A_2A_3</math>. Материал всех звеньев: Сталь 25 ГОСТ 1050-88</p> <p>Ведущие двигатели подключены к шарнирам А и шарниру Е. Положение осей неподвижной системы координат определить самостоятельно. Скорость перемещения точки Е должна быть не менее 5 м/с</p>

## 4. Реализация задач физического содержания

Следующим этапом моделирования машин и механизмов с помощью библиотеки SimMechanics, пакета Simulink, среды MATLAB, является решение задач, осложнённых физическими и математическими законами, присутствием внешних воздействий, сил сопротивления, наличием высших кинематических пар. Спектр подобных задач крайне велик, и любая пространственная задача, из рассмотренных ранее, может быть усложнена. Следует отдельно отметить, что в данном разделе будут решены задачи физического характера, в том числе баллистические.

Ранее, в разделах 2 и 3 (Таблицы 2.1 и 3.1) был подробно рассмотрен вопрос о классификации кинематических пар и их представлении в библиотеке SimMechanics. Для решения задач раздела 4 необходимо помнить главы курса «Теория машин и механизмов»: «Структурный анализ и классификация плоских механизмов», «Кинематика точки и твёрдого тела», «Принцип возможных перемещений, а также главу курса «Теоретической механики»: «Уравнение динамики» и др. С перечисленными главами студент может подробнее ознакомиться самостоятельно по рекомендованной литературе [4, 6, 8, 9].

### 4.1. Краткие теоретические сведения

#### Уравнения Лагранжа

Уравнения Лагранжа (4.1) дают единый и простой метод решения задач динамики. Важное преимущество этих уравнений состоит в том, что их вид и число не зависят ни от количества тел (или точек), входящих в рассматриваемую систему, ни от того, как эти тела движутся. Число уравнений Лагранжа определяется только числом степеней свободы системы. Кроме того, при идеальных связях, в правые части уравнений (4.1) входят обобщенные активные силы, и, следовательно, эти уравнения позволяют заранее исключить из рассмотрения все наперед неизвестные реакции связей.

Основная задача динамики в обобщенных координатах состоит в том, чтобы, зная обобщенные силы  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i$  и начальные условия, найти закон движения системы, т. е. определить обобщенные координаты  $q_1, q_2, \dots, q_i$  как функции времени. Так как кинетическая энергия  $T$  зависит от обобщенных скоростей  $\dot{q}_i$ , то, при дифференцировании первых членов уравнений (4.1) по  $t$  в левых частях этих уравнений, появятся вторые производные по времени  $\ddot{q}_i$  от искомым координат. Следовательно, уравнения Лагранжа представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения второго порядка относительно обобщенных координат  $q_1, q_2, \dots, q_i$ .

Уравнениями Лагранжа можно пользоваться для изучения движения любой механической системы с геометрическими или сводящимися к геометрическому (голономным) связями, независимо от того, сколько тел (или точек) входит в систему, как движутся эти тела, и какое движение (абсолютное или относительное) рассматривается. Чтобы для данной механической системы составить уравнения Лагранжа, надо:

1) Установить число степеней свободы системы и выбрать обобщенные координаты;

2) Изобразить систему в произвольном положении и показать на рисунке все действующие силы (для систем с идеальными связями только активные);

3) Вычислить обобщенные силы  $Q$ , при этом каждое сообщаемое системе возможное перемещение должно быть направлено так, чтобы приращение соответствующей координаты было положительным;

4) Определить кинетическую энергию  $T$  системы в ее абсолютном движении и выразить ее через обобщенные координаты  $q_i$  и обобщенные скорости  $\dot{q}_i$

5) Подсчитать соответствующие частные производные от  $T$  по  $q_i$  и  $\dot{q}_i$ , и подставить все значения в уравнения (4.1):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = Q_1 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = Q_2 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \end{cases} \quad (4.1)$$

Указанным путем уравнения Лагранжа составляются независимо от того, рассматривается ли абсолютное (по отношению к инерциальной системе отсчета) или относительное движение механической системы. Но, в последнем случае, возможен и другой путь, а именно: кинетическую энергию системы определять в ее относительном движении. Но, при нахождении обобщенных сил, присоединить к силам, действующим на систему, переносные силы инерции (чего при использовании первого пути делать не надо). Из полученных уравнений, если заданы действующие силы и начальные условия, можно, интегрируя эти уравнения, найти закон движения системы в виде (4.1). Если же задан закон движения, то составленные уравнения позволяют определить действующие силы.

Когда все приложенные к системе силы являются потенциальными, уравнения Лагранжа можно составлять в виде (4.1). При этом, вместо вычисления обобщенных сил, надо определить потенциальную энергию

системы, выразив ее через обобщенные координаты, и, затем, определив еще и кинетическую энергию, составить функцию Лагранжа.

Рекомендуемый алгоритм решения задач.

1. Определить основные физические и математические законы функционирования системы.
2. Провести кинематический анализ системы, исследовать её структуру, посчитать число степеней свободы. Провести классификацию всех кинематических пар.
3. Определить начальное и выходное звено.
4. Проанализировать закономерность движения механизма (написать уравнения движения в форме уравнений Лагранжа или др.)
5. Создать управляющий «.m» файл. Описать физические свойства объектов моделирования (масса, плотность материалов элементов, длины, тензоры инерции и др.).
6. Создать модель «.mdl»
7. Провести проверку работоспособности модели «.mdl».
8. Провести анализ результатов моделирования, сравнить с теоритическими вычислениями.

### Пример 1. Модель трёхмассовой системы с упруго диссипативными силами

В качестве первого примера в разделе 4 предлагается рассмотреть модель трёхмассовой системы с упруго диссипативными силами.

На кинематической схеме (рис. № 4.1) три последовательно соединённые массы перемещаются относительно друг друга вдоль оси X. В системе присутствует упругая составляющая  $c_n$  и демпфирование  $b_n$ .

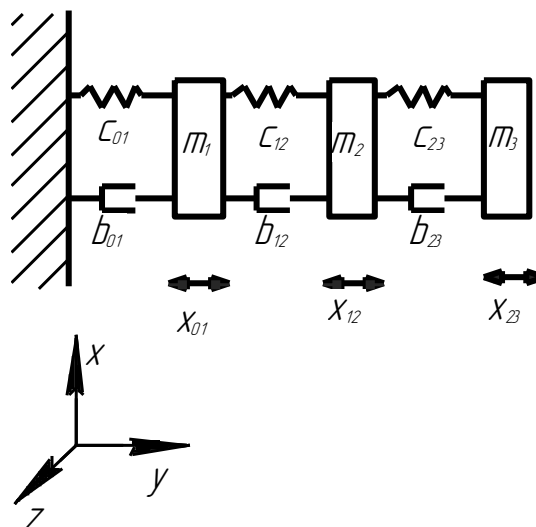


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема трёхмассовой системы.

Вышеописанная система имеет три степени свободы. Каждая масса может совершать независимые перемещения вдоль оси  $X$ , под воздействием внешних сил. Перемещения масс обозначим через  $x_{01}$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{23}$  и примем их за обобщённые координаты для составления уравнения Лагранжа (4.1). Система уравнений движения механической системы в обобщенных координатах для данной задачи принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = Q_1 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = Q_2, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_3} = Q_3 \end{cases} \quad (4.2)$$

где:  $q_1 = x_{01}$ ,  $q_2 = x_{12}$ ,  $q_3 = x_{23}$  – обобщённые координаты системы,  
 $Q_n$  – обобщенные силы, соответствующие координатам  $q_n$ .

На рисунке 4.2 представлена структурная модель SimMechanics трёхмассовой системы.

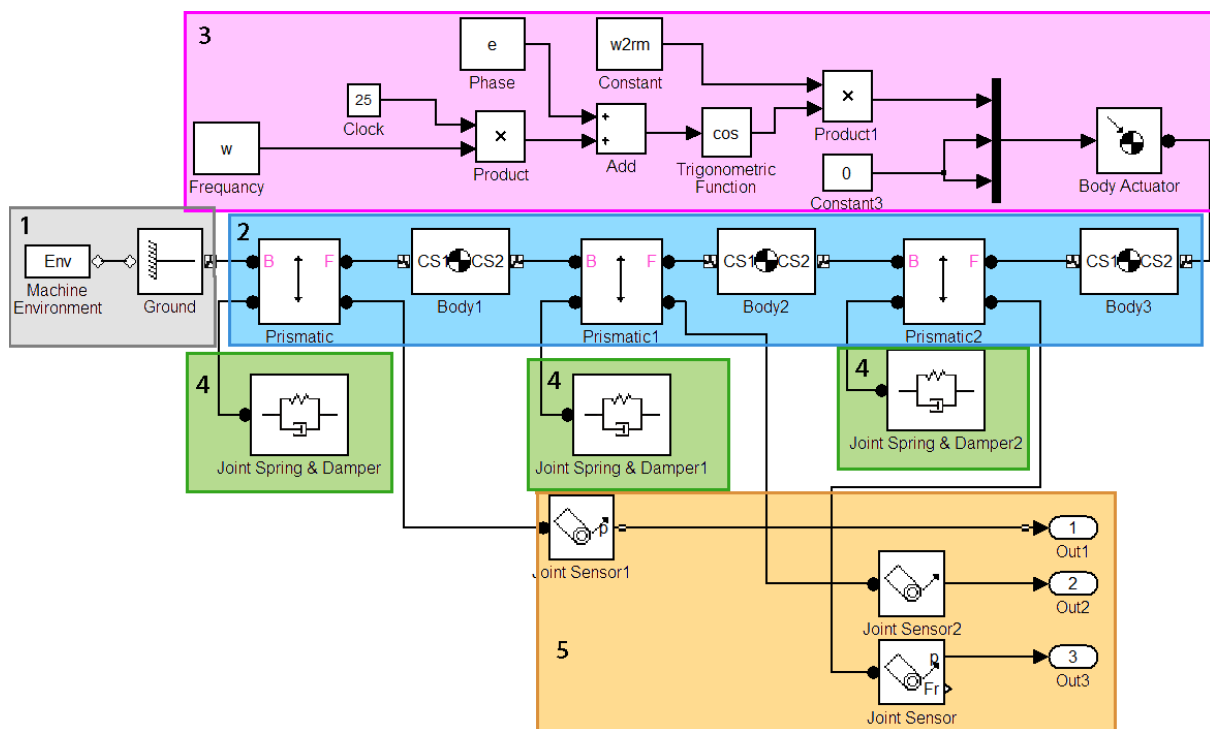


Рисунок 4.2 – Структурная модель SimMechanics трёхмассовой системы

1 – блоки Machine Environment, Ground задают гравитационные силы, приложенные к глобальной системе координат, совпадающей с системой отсчёта первого звена; 2 – блоки Prismatic, Body1, Prismatic1, Body2, Prismatic2, Body3 определяют положение элементов в глобальной координатной системе, они соединены с помощью поступательной кинематической пары; 3 – управляющее воздействие; 4 – блоки Joint Spring & Damper, Joint Spring & Damper1, Joint Spring & Damper2 определяют упруго-диссипативные силы между каждым телом; 5 – блоки Joing Sensor, Joing Sensor1, Joing Sensor 2, Out, Out1, Out2 выводят результат работы модели в графической форме.

Параметры и настройки каждого блока и текст управляющей программы приведены в приложении В1.

На рис. 4.3 представлена анимированная модель SimMechanics.

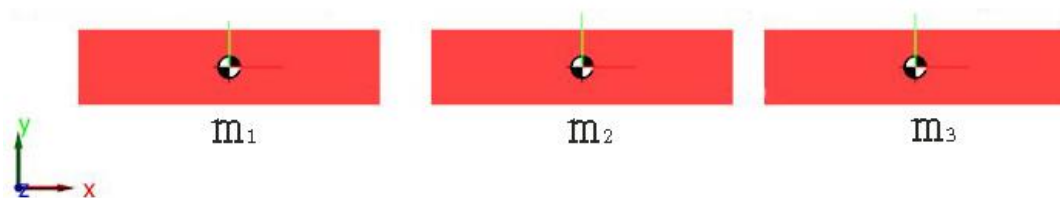


Рисунок 4.3 – Результаты работы анимированной модели трёхмассовой системы в SimMechanics

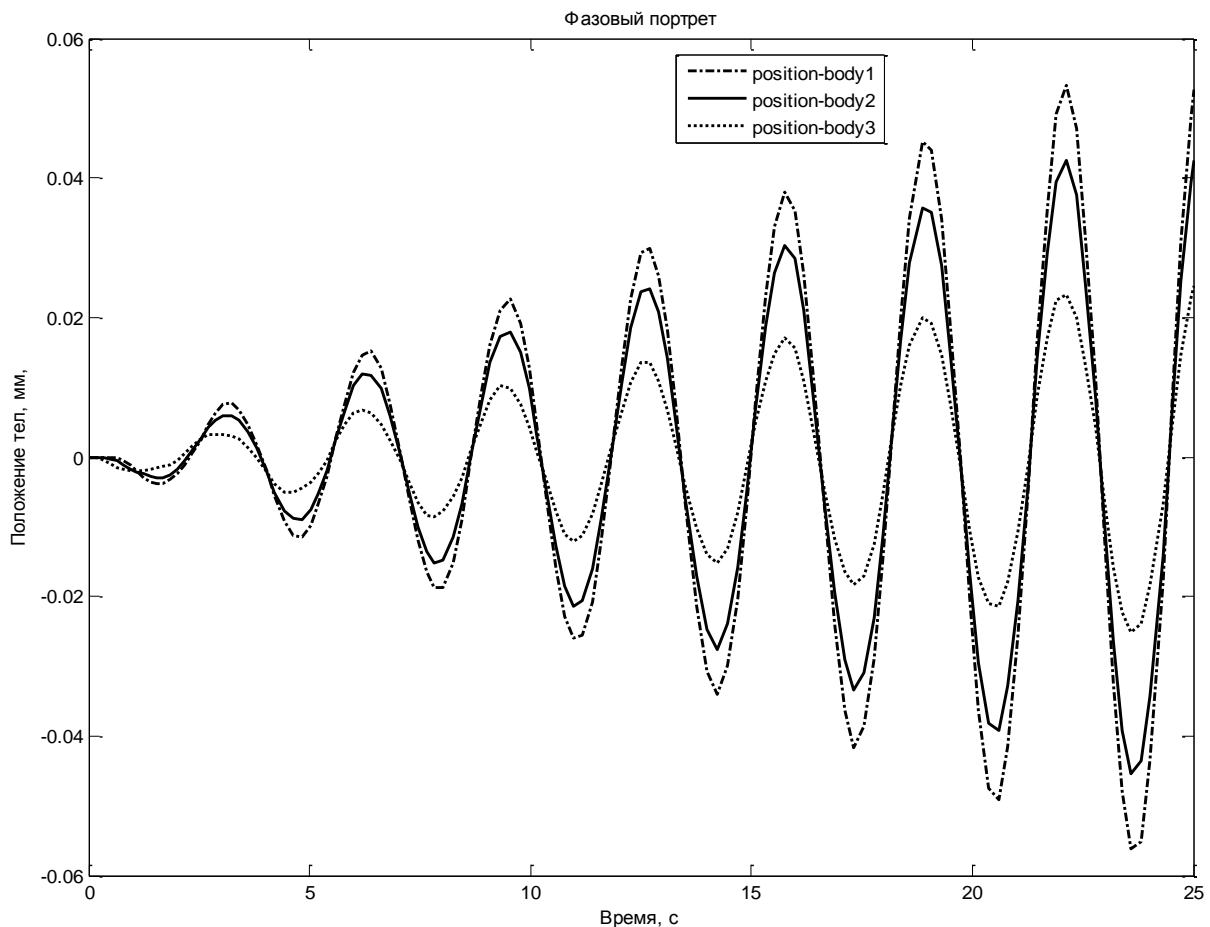


Рисунок 4.4– Результаты работы модели SimMechanics трёхмассовой системы.

## Пример 2. Построение статических моделей трения

Продолжая анализировать возможности MATLAB, актуально более подробно остановиться на возможностях моделирования сил трения. Данный пример является логическим продолжением примера три из третьего раздела и освещает некоторые вопросы моделирования фрикционного взаимодействия.

В статических моделях трения зависимость силы трения от скорости неизменна. Величину трения в Simulink удобно определять с помощью блока трения Coulomb & Viscous Friction из раздела Discontinuities. На вход подается скорость движения тела, на выходе получается значение силы трения. В основе работы блока лежит известная формула:

$$F_{mp} = \text{sign}(v) \cdot (\mu \cdot |v| + \eta), \quad (4.3)$$

где:  $\text{sign}$  – функция определения знака переменной,  $v$  – скорость,  $\eta$  – коэффициент сухого трения,  $\mu$  – коэффициент вязкого трения.

При необходимости задания только одного вида трения, второй коэффициент принимают равным нулю. В случае наличия только сухого трения, блок трения принимает вид представленный на рисунке 4.6 (а). Подадим на вход сигнал изменения скорости, в виде синусоидального воздействия (блок Sine Wave) с амплитудой 1 и частотой 2 рад/с (рис.4.5).

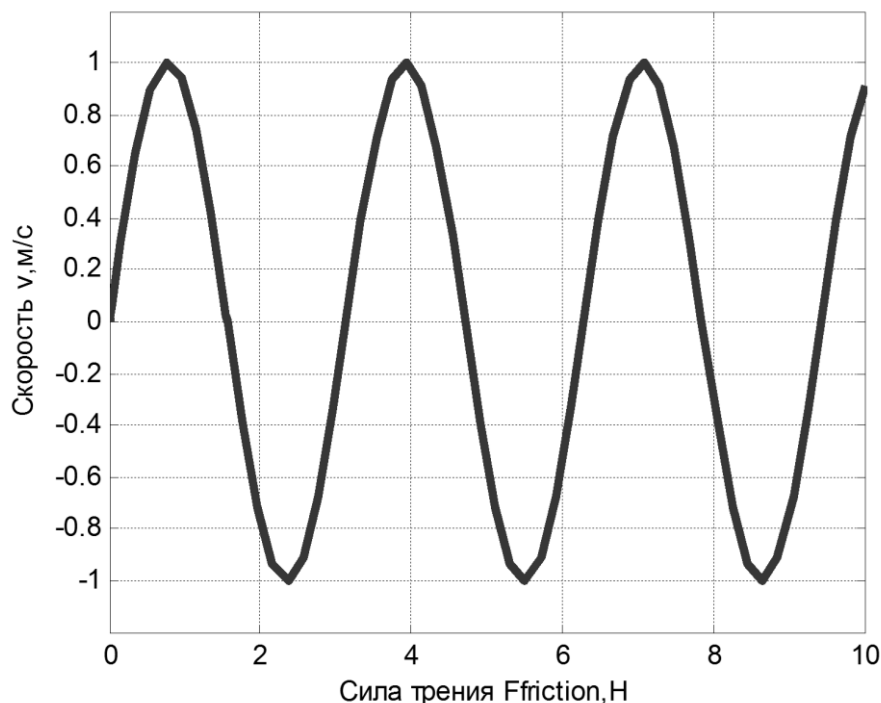
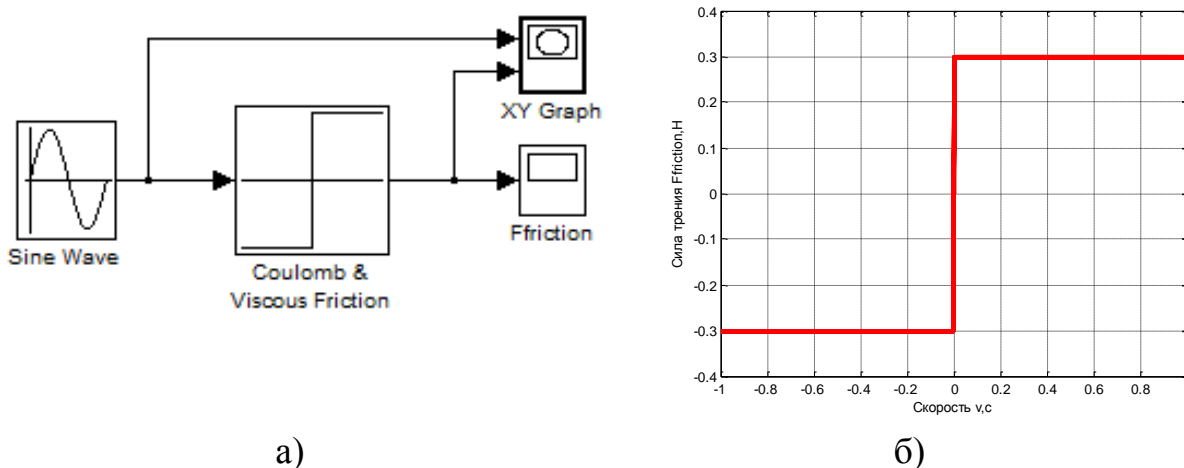


Рисунок 4.5 – Входное воздействие в моделях трения

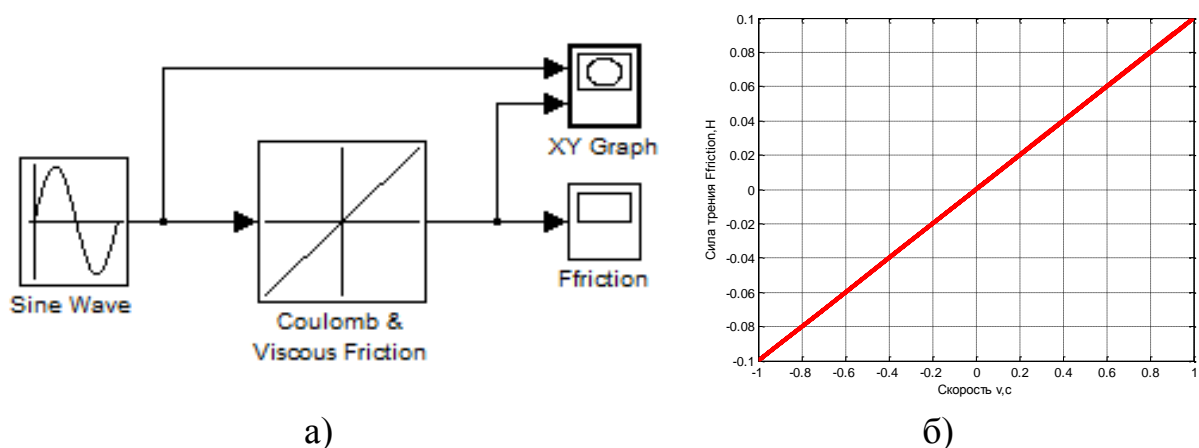
Результат – зависимость силы трения от скорости:  $f = F_{mp}(v)$  снимаем при помощи блока построения графика XY Graph: рис. 4.6 (а). При



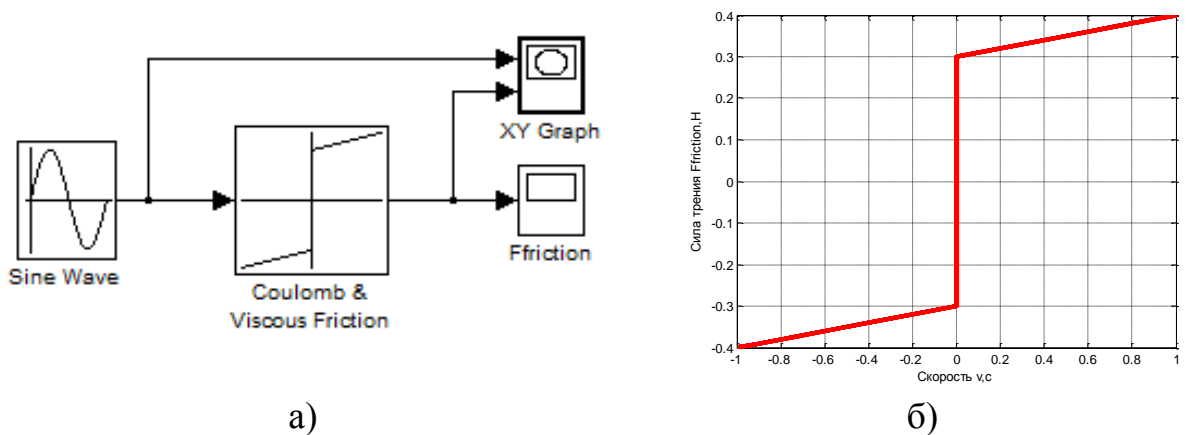
наличии только вязкого трения, система и получаемый закон:  $f = F_{mp}(v)$  имеют вид, показанный на рис. 4.7 (а). При наличии обоих видов трения (смешанное трение) система и получаемый закон принимают вид показанный на рис. 4.8 (а).



а) б)  
Рисунок 4.6 – Моделирование сухого трения а) схема моделирования, б) получаемый закон изменения силы трения от скорости



а) б)  
Рисунок 4.7 – Моделирование вязкого трения а) схема моделирования, б) получаемый закон



а) б)  
Рисунок 4.8 – Моделирование смешанного трения а) схема моделирования, б) получаемый закон

Далее, рассмотрим пример моделирования механической системы с учётом трения. В качестве исследуемой системы, построим модель бруска массой  $m=1\text{кг}$ , движущегося прямолинейно вдоль горизонтальной оси под действием силы  $F_{in}=1\text{Н}$ . На брусок, со стороны поверхности, действует сила трения  $F_{friction}$  с коэффициентами сухого и вязкого трения равными 0,3 и 0,1, соответственно (Рис.4.9).

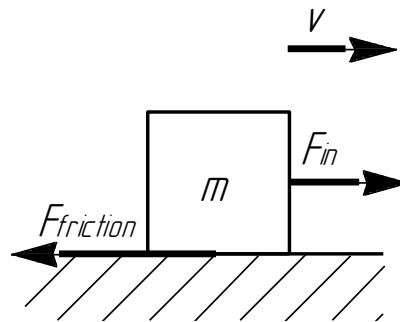


Рисунок 4.9 – Схема исследуемой системы

Брусок моделируем с помощью блока Body, задавая массу, моменты инерции и координаты положения (блок Brusok на рисунке 4.10). Соединяем блок со стойкой (Ground) поступательной парой (Prismatic), ось которой параллельна оси x. Блок Machine Environment определяет направление и величину гравитационных сил, оставляем значения по умолчанию (направление вдоль оси y, ускорение  $-9,8\text{м/с}^2$ ). Сила, воздействующая на брусок, задается с помощью блока Joint Actuator, ее величина как переменный параметр подается на вход.  $F_{in}$  – входная сила, величина постоянная (блок Fin).

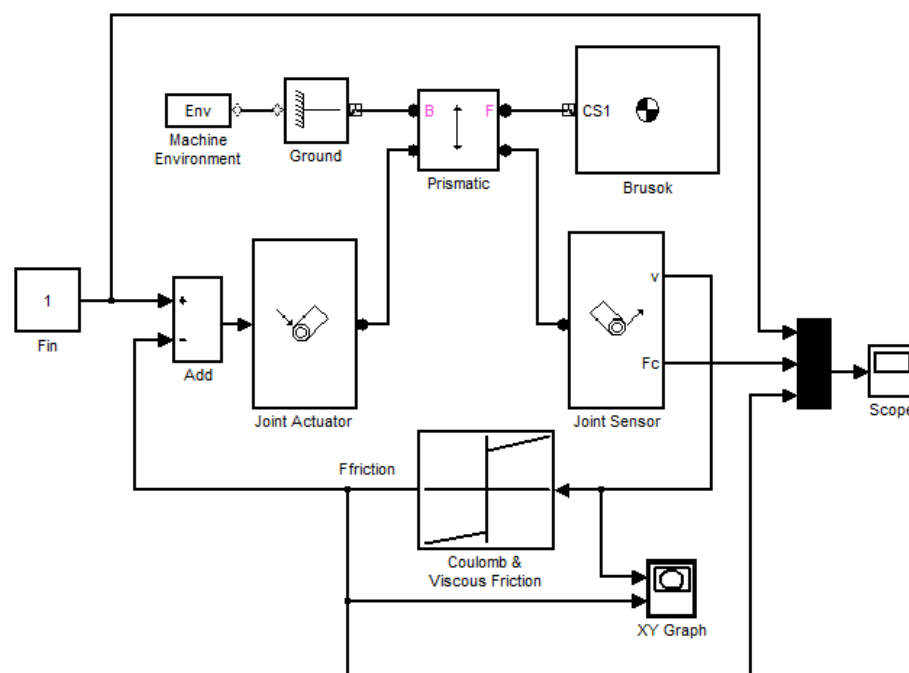


Рисунок 4.10 – Структурная модель SimMechanics для моделирования статического трения

Для учета влияния трения в модели, создаем обратную связь. Скорость движения бруска снимается датчиком (блок Joint Sensor) и подается на вход блока трения (Coulomb & Viscous Friction). Полученное значение силы трения отнимается от значения входной силы (блок Add), замыкая обратную связь по силе. С помощью блока Scope строим зависимости от времени для входной силы ( $F_{in}$ ), силы трения ( $F_{friction}$ ) и результирующей силы, приложенной к телу ( $F_c$ ). Результат работы модели и выходные данные приведены на рисунке 4.11, 4.12.

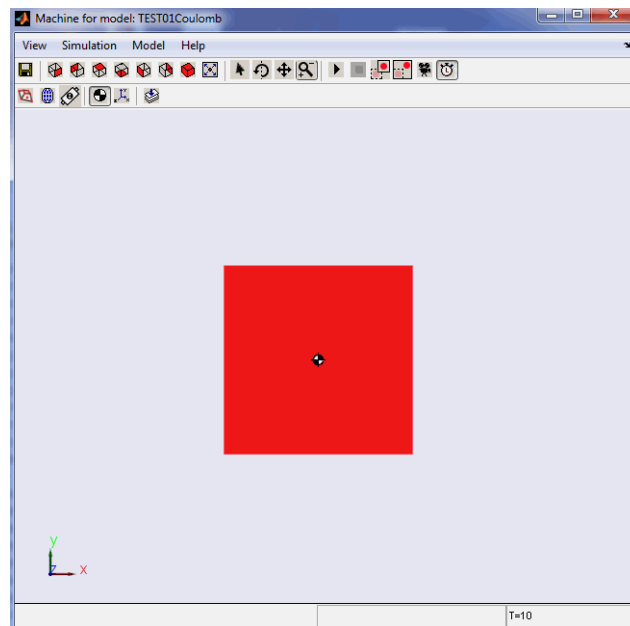


Рисунок 4.11 – Результаты работы анимированной модели системы с статическим трением в SimMechanics

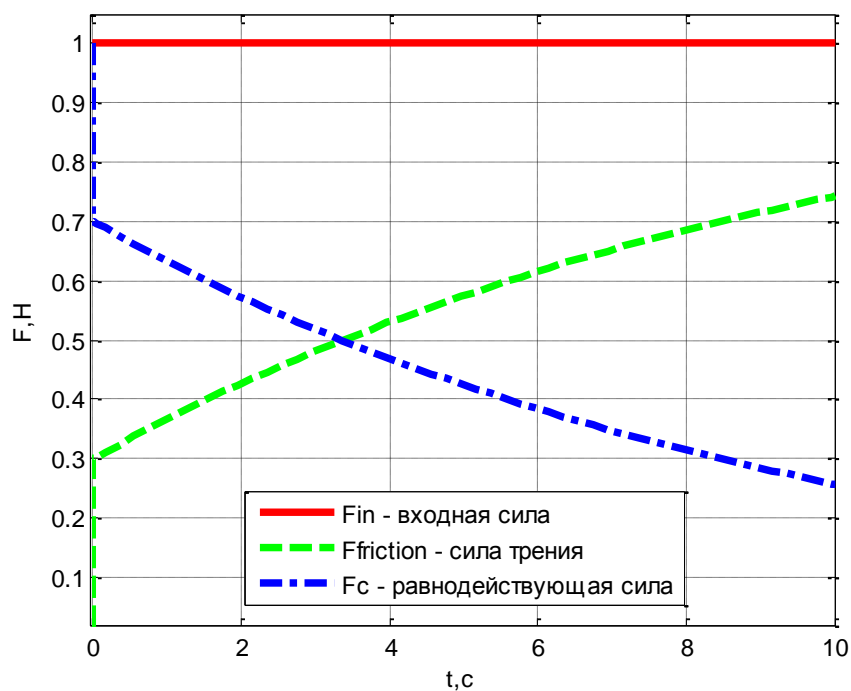


Рисунок 4.12 – Характер изменения сил, действующих в системе

### Пример 3. Баллистическая задача

В примере рассмотрена задача движения снаряда, запущенного из орудия под углом к горизонту. На снаряд действует сила сопротивления воздуха и сила ветра.

Исходные данные задаем с помощью M-файла (рис.4.13): масса снаряда 20кг, начальная скорость 400м/с, угол выстрела 40град, скорость ветра 50м/с, угол ветра 35°, сопротивление воздуха 45%. Для прицельного попадания снаряда введена поправка на ветер 3°.

```
%Баллистическая задача
%Исходные данные
m=20.0; %Масса тела
V0=400.0; %Начальная скорость
a1=40*pi/180; %Угол выстрела
b=0.45; %Сопротивление воздуха
g=9.807; %Ускорение свободного падения
Vb=50.0; %Скорость ветра
bet=35*pi/180; %Угол ветра
gm=3*pi/180; %Поправка на ветер

plot3(x,y,z,'r-'),grid%Построение графика
```

Рисунок 4.13 – M-файл с исходными данными баллистической задачи

Для решения задачи, с помощью блока Body задаем тело – снаряд с известной массой и моментами инерции (см. рис. 4.14). Снаряд принимаем за материальную точку и считаем, что, при его движении в трехмерном пространстве, он имеет три поступательные степени свободы. Для этого, соединяем блок тела с неподвижной системой отсчета (Ground) при помощи блока сочленения (Custom Joint). Степени свободы относительно осей x, y, z задаются как параметры блока и обозначаются, соответственно, P1, P2, P3 (см. рис. 4.15). Силу и направление гравитации задаем блоком Machine Environment.

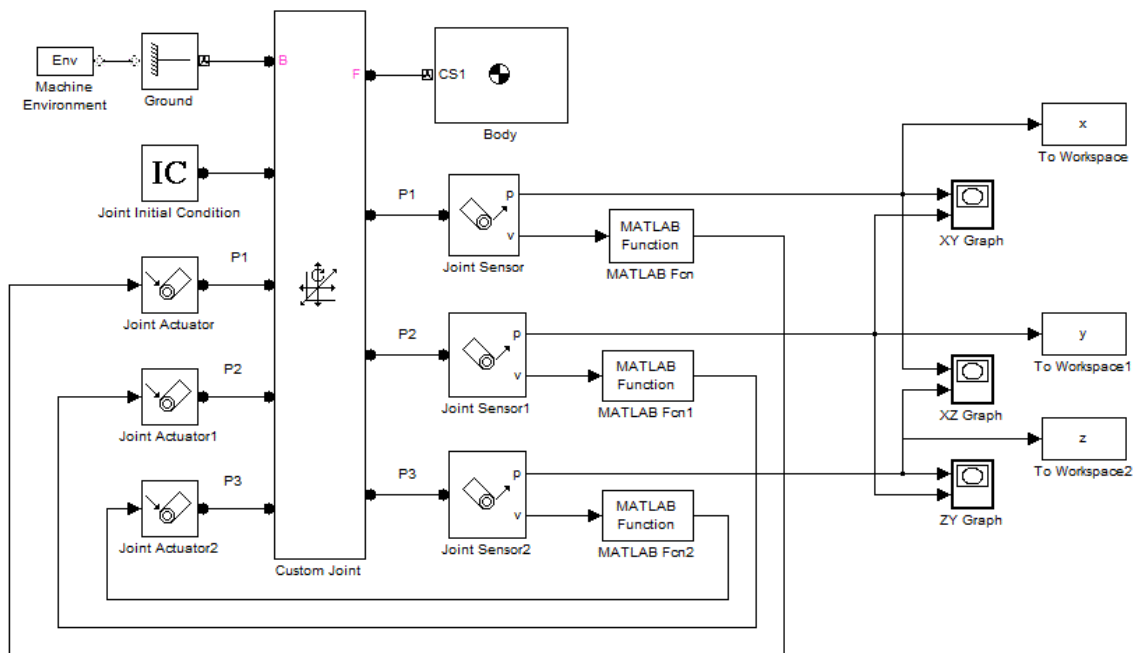


Рисунок 4.14 – Структурная модель SimMechanics для решения баллистической задачи

Parameters

Axes    Advanced

Name - Primitive	Axis of Action [x v z]	Reference CS
P1 - Prismatic	[1 0 0]	World
P2 - Prismatic	[0 1 0]	World
P3 - Prismatic	[0 0 1]	World

Рисунок 4.15 – Параметры блока Custom Joint

Для задания начальных условий движения, таких как: скорость в момент выстрела, угол выстрела и угол поправки на ветер, используем блок начальных условий (Joint Initial Condition). В параметрах блока задаем начальную позицию тела – точку  $O(0,0,0)$  и скорости вдоль каждой из осей:

$$\begin{cases} V_x = V_0 \cdot \cos(al) \cdot \cos(gm); \\ V_y = V_0 \cdot \sin(al); \\ V_z = V_0 \cdot \cos(al) \cdot \sin(gm), \end{cases} \quad (4.4)$$

где:  $V_0$  – начальная скорость,  $al$  - угол выстрела,  $gm$  - угол поправки на ветер.

Окно блока начальных условий показано на рисунке 4.16.

Actuation					
Enable	Primitive	Position	Units	Velocity	Units
<input checked="" type="checkbox"/>	P1		0 m	$V0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma_m)$	m/s
<input checked="" type="checkbox"/>	P2		0 m	$V0 \cdot \sin(\alpha)$	m/s
<input checked="" type="checkbox"/>	P3		0 m	$V0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma_m)$	m/s

Рисунок 4.16 – Параметры блока начальных условий Joint Initial Condition

Для задания сил сопротивления со стороны воздуха и ветра используем ряд обратных связей, где силы сопротивления вдоль каждой из координат определяются системой:

$$\begin{cases} F_x = b \cdot (Vb \cdot \cos(\beta) - V_x); \\ F_y = -b \cdot V_y; \\ F_z = -b \cdot (Vb \cdot \sin(\beta) + V_z), \end{cases} \quad (4.5)$$

где:  $b$  - сопротивление ветра,  $Vb$  - скорость ветра,  $\beta$  - угол ветра,  $V_x, V_y, V_z$  - скорости тела вдоль осей координат.

Каждая обратная связь представляет собой ряд блоков, соединенных последовательно: Датчик (Joint Sensor) – Функция (Matlab Function) – Двигатель (Joint Actuator), см. рис. 4.14. Датчик снимает скорость тела вдоль координаты, функция определяет силу по соответствующему уравнению (4.5), сила прикладывается к каждой координате с помощью двигателя см. рис. 4.14.

Результаты – зависимости координат тела от времени – определяются с помощью датчиков, рассмотренных выше. Графики движения тела строятся с помощью блоков построения графика (Graph) в трех плоскостях: XY, XZ, ZY (рис.4.17, рис.4.18 (а), (б)). Для построения трехмерного графика сохраняем данные в рабочей области при помощи блоков To Workspase и используем функцию plot в М-файле (см.рис.4.13). Результат работы модели представлен на рисунке 4.19.

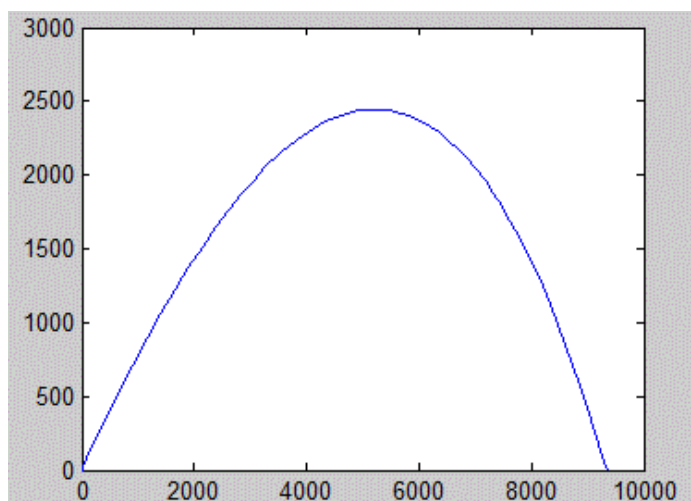


Рисунок 4.17 – Графики движения тела в плоскостях XY

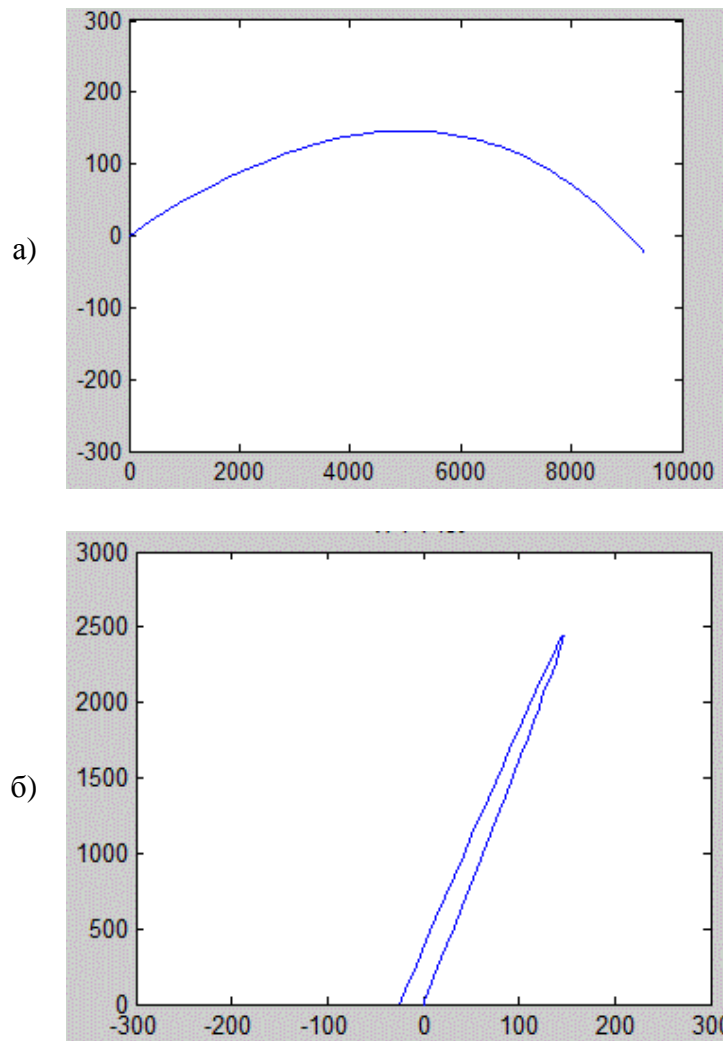


Рисунок 4.18 – Графики движения тела в плоскостях: а) XZ б) ZY

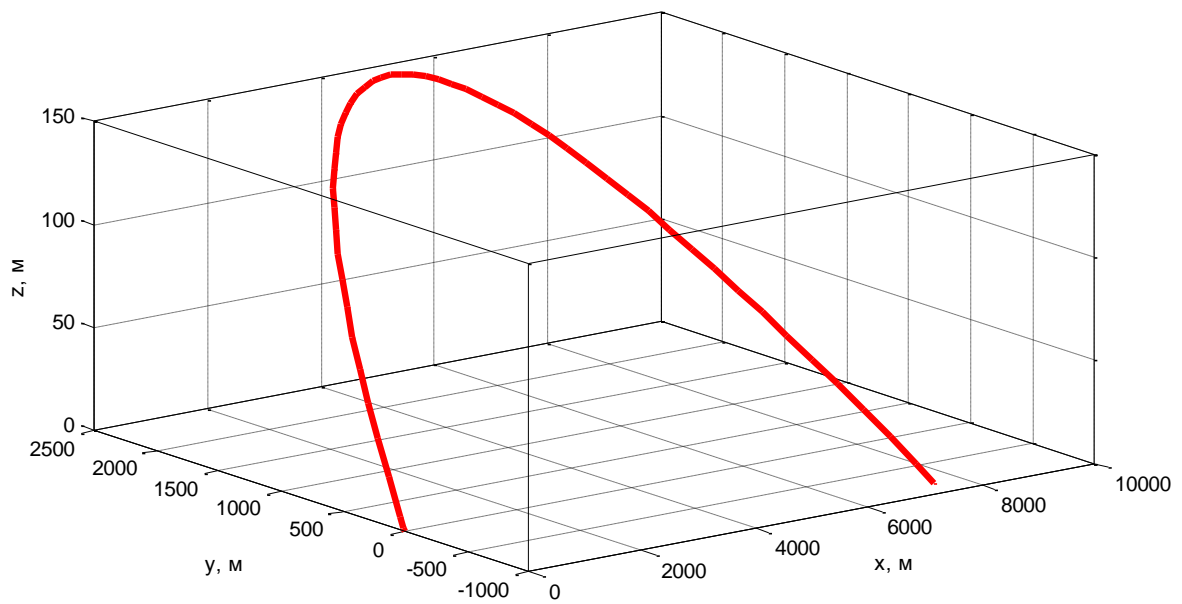


Рисунок 4.19 – График движения тела в системе координат x, y, z

## Задачи для самостоятельной работы к разделу 4

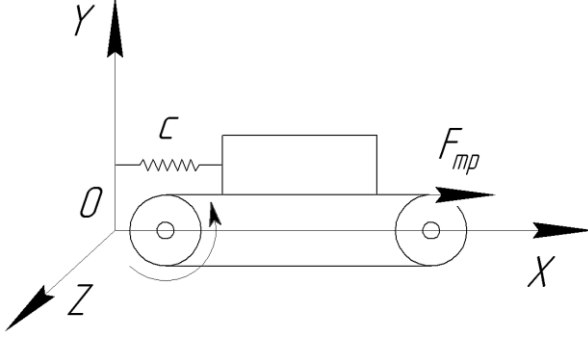
Во всех вариантах необходимо выполнить следующие задачи (см. Таблицу 4.1):

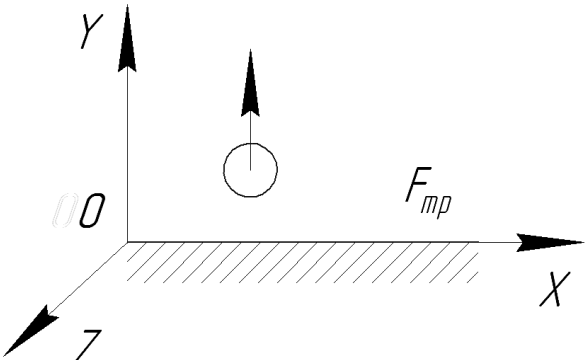
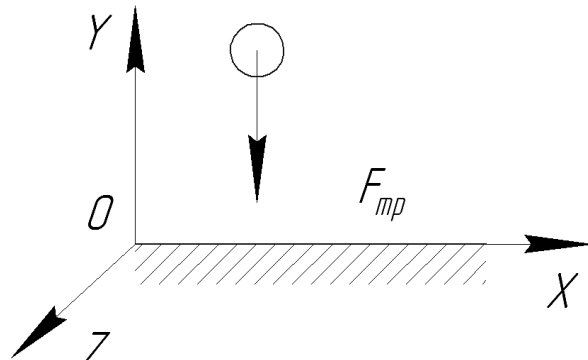
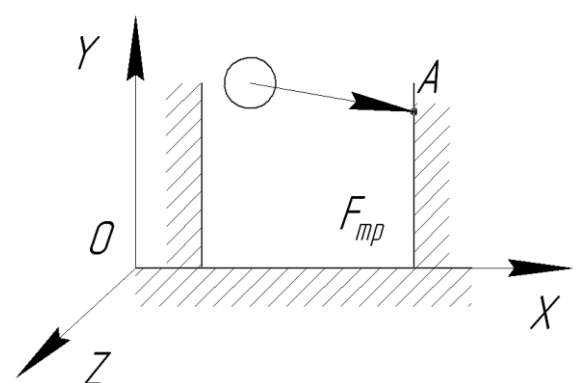
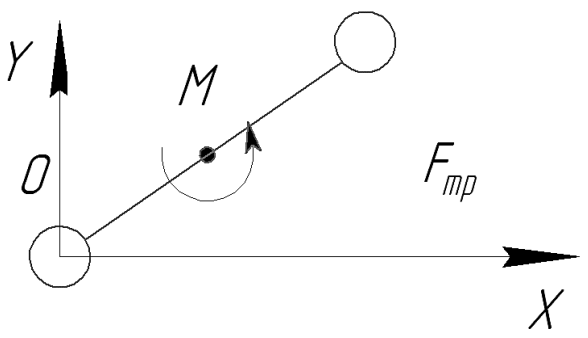
1. Провести кинематический анализ предложенного механизма.
2. Построить механизм, используя блоки SimMechanics и Simulink.
3. Создать управляющий файл.
4. Подключить двигатели к звеньям системы.
5. Проанализировать силы, действующие на систему.
6. Исследовать движение механизма (подключить датчики, силы и др.), сделать вывод данных.
7. Подготовить отчёт.

Таблица 4.1. Задачи для самостоятельной работы к разделу 4

№	Схема	Исходные данные
1	2	3
1		<p>Создать модель гироскопа. Ввести силу сухого трения в опорах. Провести анализ изменения угловой скорости и ускорения системы относительно трёх угловых координат <math>\varphi, \psi, \gamma</math>.</p>
2		<p>На брусок массой <math>m</math> действует мгновенная движущая сила <math>F</math> вдоль направления оси <math>X</math>. Между бруском и поверхностью присутствует сила сухого трения <math>F_{тр}</math>, демпфирование <math>b</math> и жесткость <math>c</math>. Проанализировать движение бруска. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>
3		<p>На брусок массой <math>m</math> действует мгновенная движущая сила <math>F</math> вдоль направления оси <math>X</math>. Между бруском и поверхностью присутствует сила сухого трения <math>F_{тр}</math>, демпфирование <math>b</math> и жесткость <math>c</math>. Проанализировать движение бруска. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>



1	2	3
4	 <p>The diagram shows a 3D coordinate system with axes X, Y, and Z. A cart with two wheels is on a horizontal surface. A force vector <math>F</math> points to the right along the X-axis. A friction force vector <math>F_{тр}</math> also points to the right from the front of the cart.</p>	<p>На брусок массой <math>m_1</math> действует мгновенная движущая сила <math>F</math> вдоль направления оси <math>X</math>. Брусок массой <math>m_2</math> движется под действием силы сухого трения <math>F_{тр}</math>. Трением качения пренебречь. Проанализировать движение брусков. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>
5	 <p>The diagram shows a 3D coordinate system with axes X, Y, and Z. A cart with two wheels is on a horizontal belt. The belt is rotating counter-clockwise, indicated by a curved arrow. A spring with stiffness <math>c</math> is attached to the left wheel. A friction force vector <math>F_{тр}</math> points to the right from the front of the cart.</p>	<p>Брусок массой <math>m</math> расположен на ленте, которая вращается против часовой стрелки. Между бруском и лентой присутствует сила сухого трения <math>F_{тр}</math> и жесткость <math>c</math>. Проанализировать движение бруска. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>
6	 <p>The diagram shows a 3D coordinate system with axes X, Y, and Z. Two rectangular masses are on a horizontal surface. The left mass is connected to a fixed wall on the left by a spring with stiffness <math>c</math> and a damper with coefficient <math>b</math>. The two masses are connected to each other by a spring with stiffness <math>c_1</math> and a damper with coefficient <math>b_1</math>.</p>	<p>Проанализировать поведение двухмассовой системы без силы трения и с ней. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>
7	 <p>The diagram shows a 3D coordinate system with axes X, Y, and Z. Two rectangular masses are on a horizontal surface. The left mass is connected to a fixed wall on the left by a spring with stiffness <math>c</math> and a damper with coefficient <math>b</math>. The two masses are connected to each other by a spring with stiffness <math>c_1</math>.</p>	<p>Проанализировать поведение двухмассовой системы без силы трения и с ней. Параметры моделирования подобрать самостоятельно, использовать минимум три набора данных.</p>

1	2	3
8		<p>Мяч массой <math>m</math> подбрасывают вертикально. Проанализировать поведение мяча от начала броска. Трением о воздух пренебречь. Коэффициент трения с землёй <math>0,4</math>.</p>
9		<p>Мяч массой <math>m</math> падает под действием силы тяжести. Проанализировать поведение мяча от начала падения. Трением о воздух пренебречь. Коэффициент трение с землёй <math>0,4</math>.</p>
10		<p>Мяч массой <math>m</math> бросают между двух стен, он сталкивается с одной из преград в точке А, затем со второй стеной в точке В. Построить модель, которая обеспечит не менее четырёх столкновений со стенами. Трением о воздух пренебречь. Коэффициент трения с преградами подобрать самостоятельно.</p>
11		<p>Двухмассовая система связана жёстким стержнем, к его центру подаётся вращающий момент. Система перемещается в плоскости ОХУ. Проанализировать характер ее движения, если коэффициент трения между плоскостью и каждой из масс одинаков/различен.</p>

## 5. Создание двигателей

В данном разделе представлено несколько примеров моделирования механических систем с двигателем.

### Пример 1. Кривошипно-коромысловый механизм

В качестве первого примера раздела 5 представлена модель кривошипно-коромыслового механизма (рис. 5.1). Он состоит из ведущего звена (кривошип) и ведомых звеньев (шатун и коромысло). Три указанных тела образуют замкнутую механическую цепь.

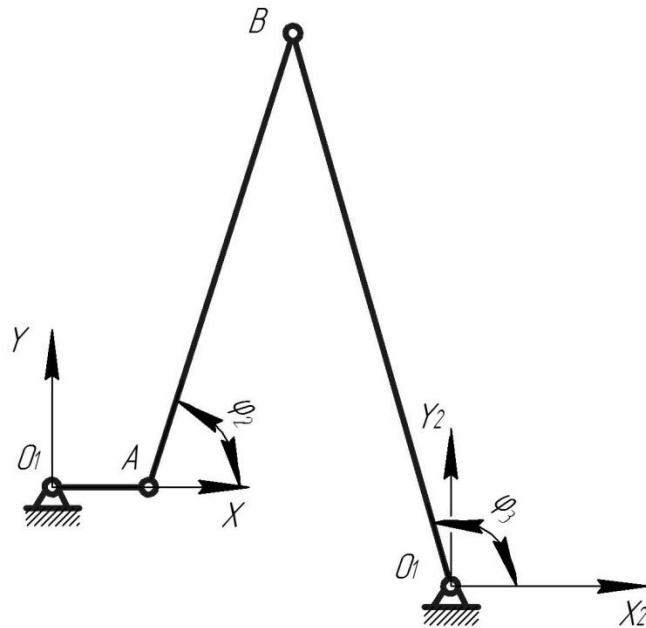


Рисунок 5.1 – Кинематическая схема кривошипно-коромыслового механизма

Используемые обозначения:

$m_1, m_2, m_3$  – массы звеньев;

$I_1, I_2, I_3$  – матрицы моментов инерции тел относительно их центров масс;

$L_1, L_2$  – расстояние от оси вращения до шарнира;

$L_3$  – расстояние между двумя шарнирами;

$L_{s2}, L_{s3}$  – расстояния от шарниров до центра звена;

$f_2, f_3$  – углы поворота звеньев

Исходные данные:

$m_1=0.2$ ;

$m_2=0.13$ ;

$m_3=0.16$ ;

$L_1=0.019$ ;

$L_2=0.1$ ;

$L_3=0.115$ ;

$L_{s2}=0.04$ ;

$L_{s3}=0.045$ ;

$x_{02}=0.08$ ;

$y_{02}=-0.02$ .

На рис. 5.2 представлена структурная модель SimMechanics (Simulink / MatLab).

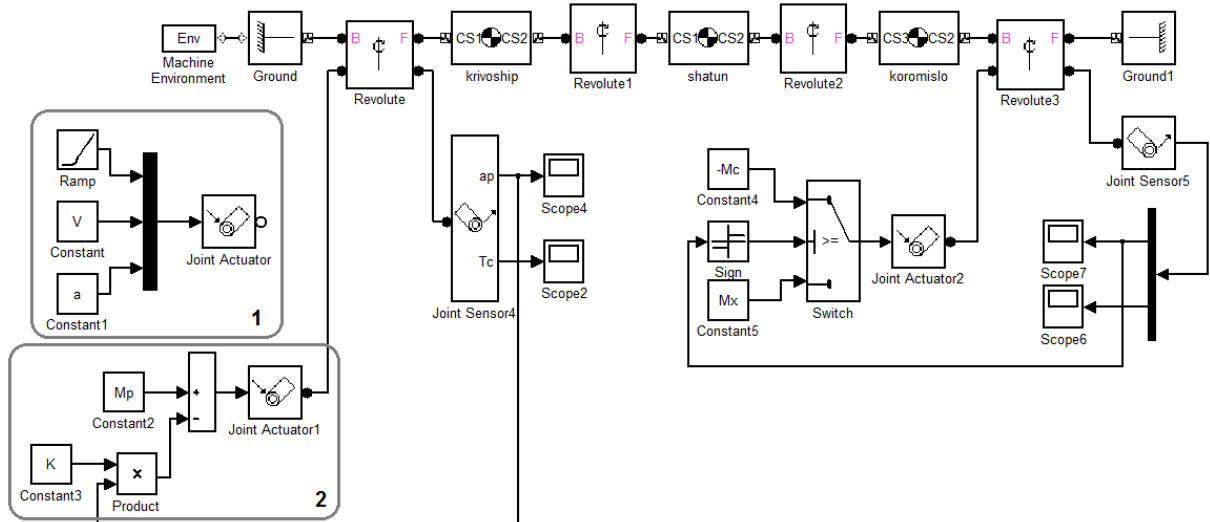


Рисунок 5.2 – Структурная модель SimMechanics кривошипно-коромыслового механизма

Для того, чтобы модель двигалась за счет вращения кривошипа, вводим блок 1 (кинематический привод), описывающий работу двигателя и нагрузку с моментом сопротивления  $M_c=20$  Нм и моментом холостого хода  $M_x=0,1$  Мс.

Подсоединяем к первому шарниру (revolute1) блок 1, в котором мы задаем угловую координату, скорость и ускорение. С этого же шарнира мы снимаем момент, который прилагается к кривошипу1. Из графика (рис 5.3) находим пусковой момент и средний момент. Угловую скорость  $\omega$  выбираем произвольно.

$$M_n = 6 \frac{H}{M} \quad M_{cp} = 2 \frac{H}{M} \omega = 1000 \frac{1}{c}$$

$$k = \frac{M_n - M_{cp}}{\omega} \quad k = 0,004$$

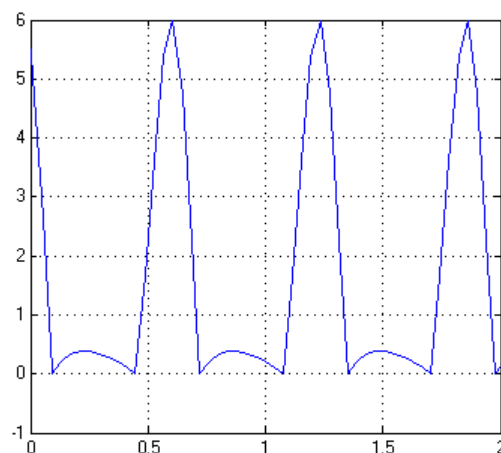


Рисунок 5.3 – График данных со Scope2

После этого подключаем блок 2, который имитирует реальный двигатель. Подставляем полученный коэффициент  $k$  и пусковой момент.

На полученных графиках скорости и момента видно, что, спустя время переходного процесса, система приходит в состояние равновесия.

На рис. 5.4 представлена анимированная модель SimMechanics кривошипно-коромыслового механизма.

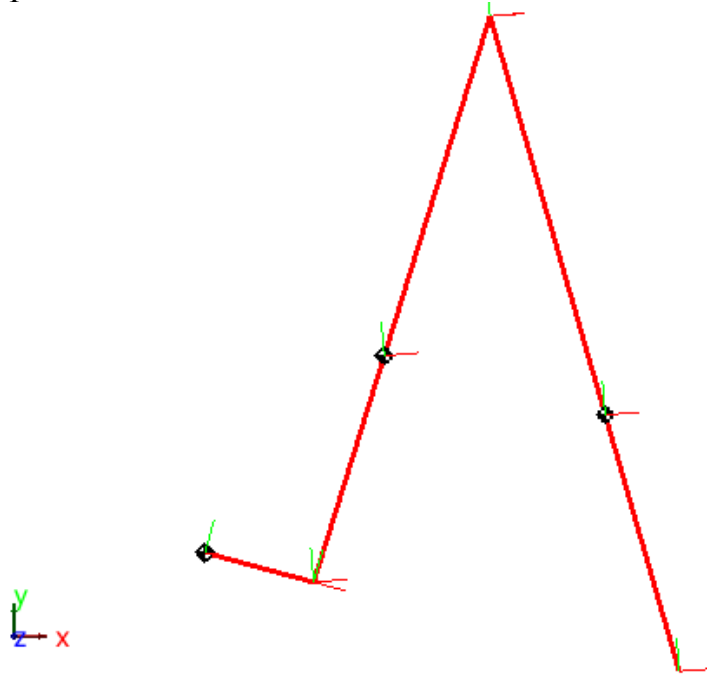


Рисунок 5.4 – Анимированная модель SimMechanics кривошипно-коромыслового механизма

На рис. 5.5 представлены результаты работы модели SimMechanics кривошипно-коромыслового механизма.

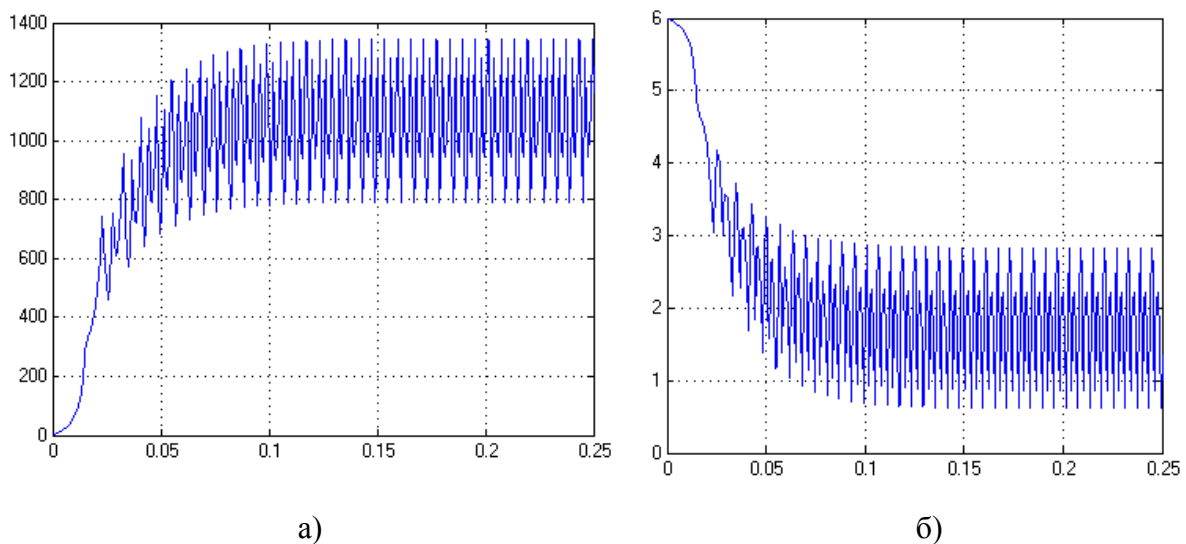


Рисунок 5.5 – Результаты работы модели SimMechanics кривошипно-коромыслового механизма: график скорости (а), график момента (б)

## Пример 2. Модель устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов с синхронным двигателем

Во втором примере раздела 5 предлагается обратиться к уже известной из раздела 2 (пример 4) модели устройства, предназначенного для изготовления упругих торсионных подвесов приборов УИСАТ. Данная модель дополняется моделью синхронного двигателя, созданной с помощью Simulink / MatLab.

Для описания электромагнитных процессов в вентильном двигателе на основе синхронной машины с неявнополюсным ротором воспользуемся математической моделью [19, 20]. Структурная схема представлена на рис. 5.6. Поскольку синхронный двигатель и усилитель мощности представлены в неподвижной системе координат, показанные на структурной схеме напряжения  $u_{1A}^*$ ,  $u_{1B}^*$  также, как токи фаз статора  $i_{1A}$  и  $i_{1B}$ , представляют собой синусоидальные величины, угловая частота которых связана со скоростью двигателя равенством  $\omega_{0эл} = p_n \omega$ . В отличие от них, сигналы на входе преобразователя координат  $u_{1d}^*$  и  $u_{1q}^*$  являются сигналами постоянного тока.

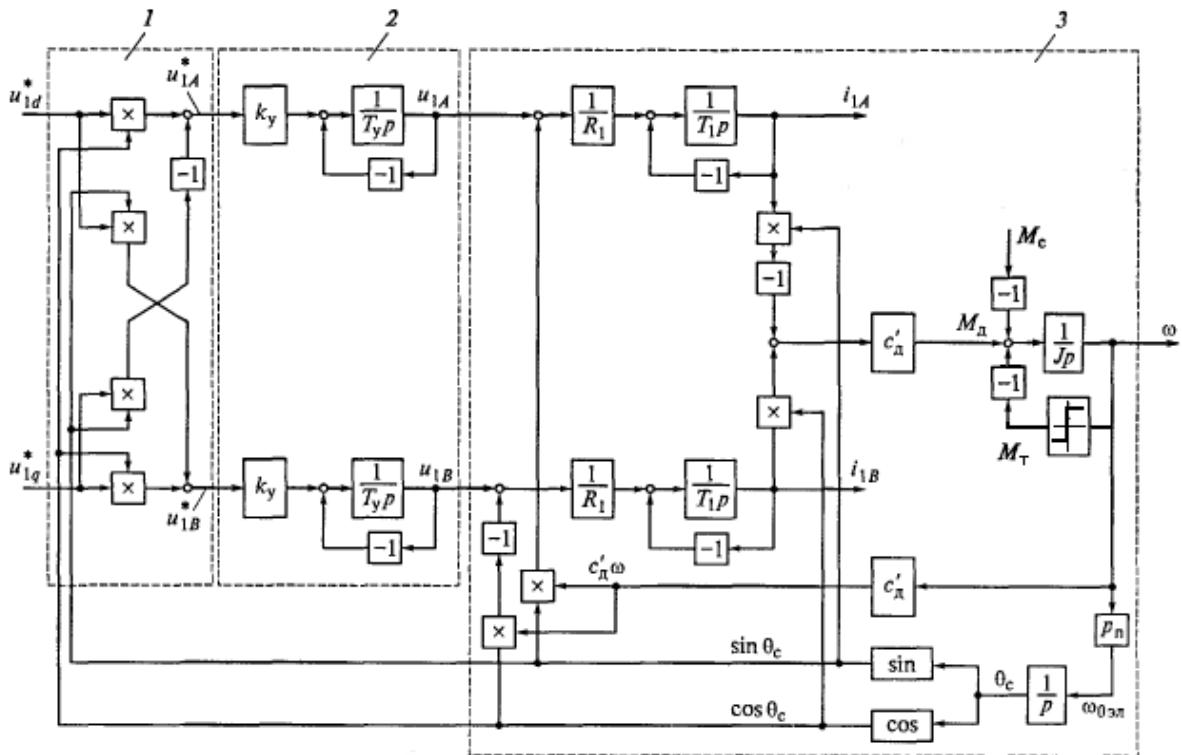


Рисунок 5.6 – Структурная схема синхронного двигателя в неподвижной системе координат: 1 – преобразователь координат, 2 – усилитель мощности, 3 – синхронный двигатель.

- $R_1$  – сопротивление фазы обмотки статора;
- $L_1$  - индуктивность статора;
- $T_1 = L_1 R_1$  - постоянная времени статорной обмотки;

$c'_d = \Psi_f p_n$  - машинный коэффициент двигателя;

$p_n$  - число пар полюсов двигателя;

$\theta_C$  - угол поворота ротора относительно системы координат статора (в электрических градусах);

$J$  - момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>;

$K_y$  - коэффициент усиления усилителя мощности;

$T_y$  – постоянная времени усилителя мощности.

Данные, необходимые для моделирования работы исполнительного механизма плетения, представлены в управляющем файле (приложение А4) были добавлены исходные данные двигателя.

На рис. 5.7 представлена структурная модель SimMechanics (Simulink / MatLab).

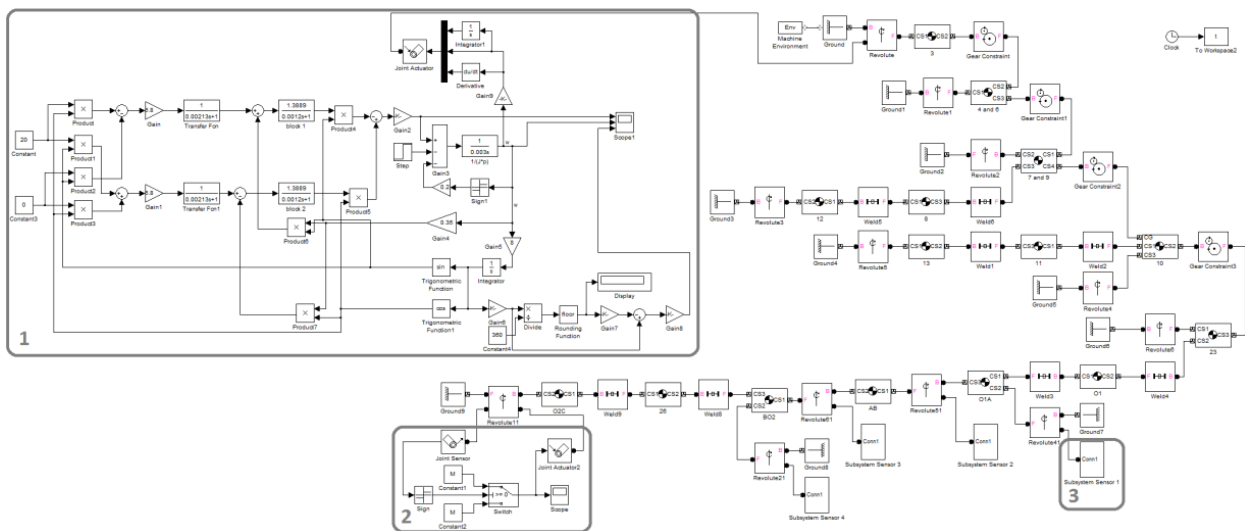


Рисунок 5.7 – Структурная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения с синхронным двигателем

На рис. 5.7: 1 – синхронный двигатель; 2 – нагрузка, приложенная к переключателю O2C; 3 – подсистема Sensor 1 (датчик 1); блоки подсистем Sensor 1 – 4 аналогичны блокам подсистемы Sensor 1 (датчик 1) рис. 4.11.

Далее, на рис. 5.8 приведено увеличенное изображение структурной модели SimMechanics блока 1 синхронного двигателя.

На рис. 5.9 приведены результаты расчетов моделирования исполнительного механизма плетения с синхронным двигателем.

Получены основные законы изменения во времени угла, угловой скорости, силы реакции относительно примитива (по осям x, y, z). На рис. 5.9 модели с синхронным двигателем в течении короткого промежутка времени (0,11 с) наблюдается переходной процесс. В пределах прикладываемых нагрузок механическая система работает стабильно.

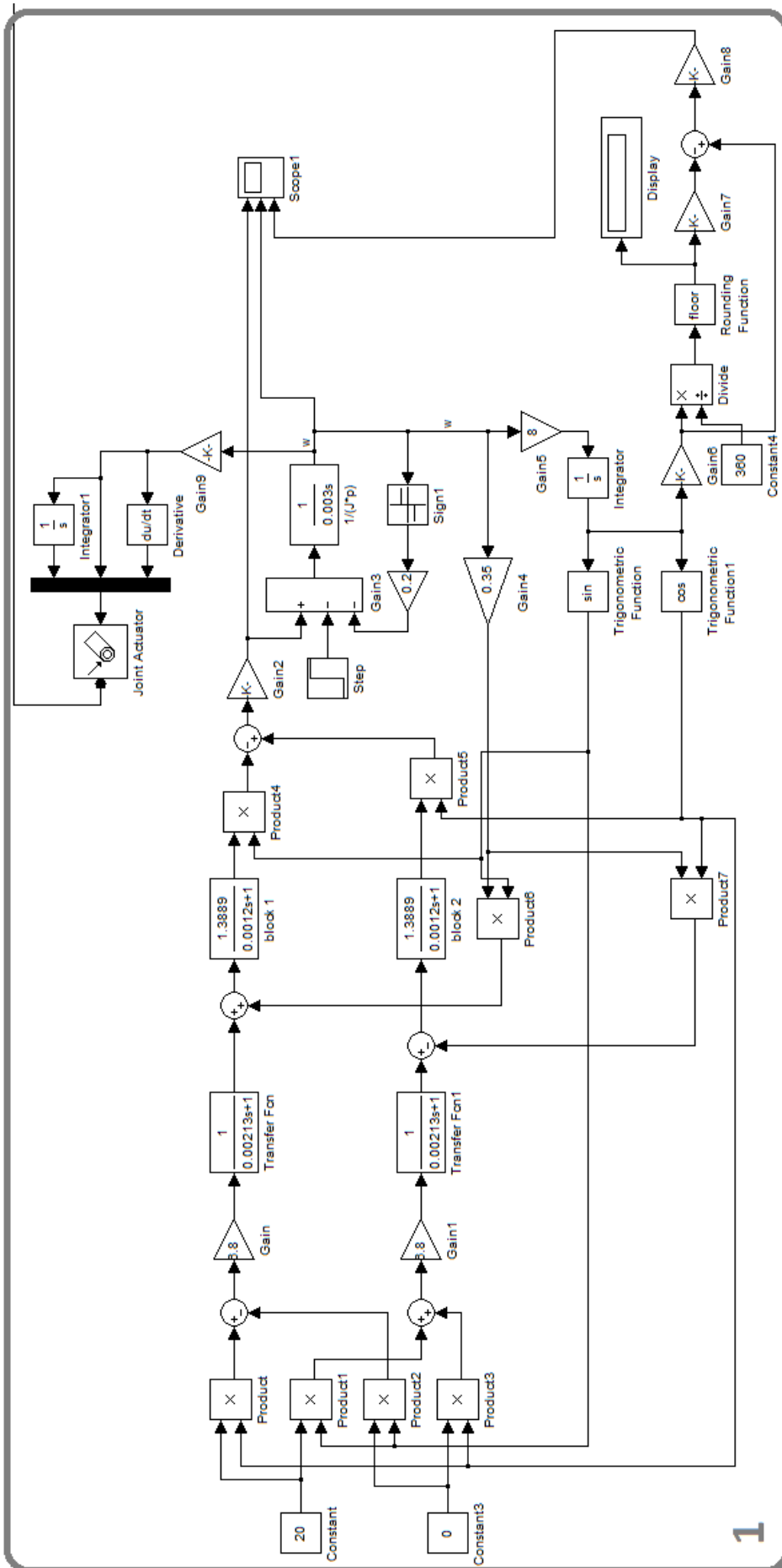


Рисунок 5.8— Увеличенное изображение структурной модели SimMechanics блока 1 синхронный двигатель



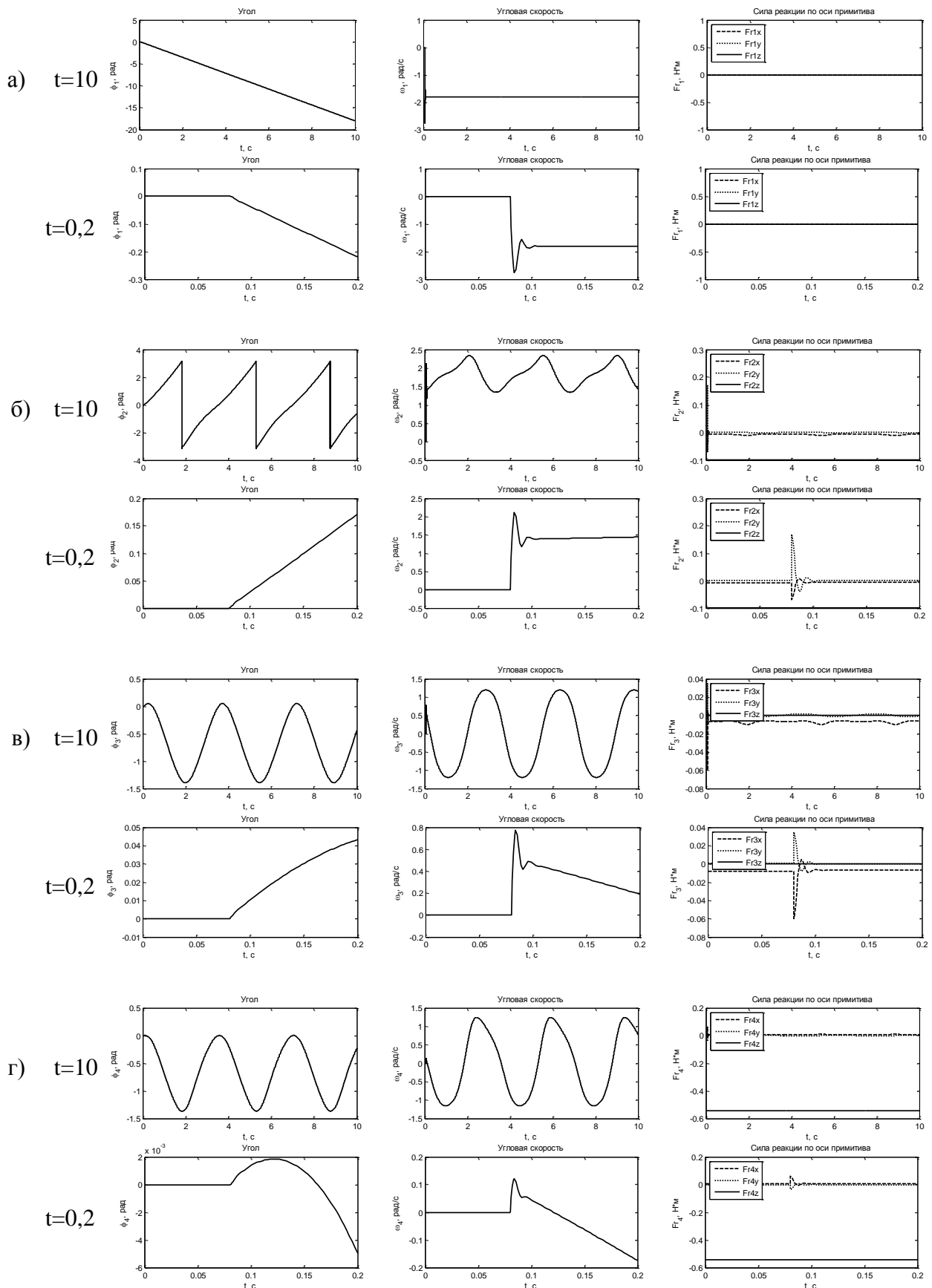


Рисунок 5.9 – Данные, поступившие с: (а) датчика 1 (кривошип O<sub>1</sub>A); (б) датчика 2 (шатун АВ) исполнительного механизма; (в) датчика 3 (коромысло ВО<sub>2</sub>); (г) датчика 4 (переключатель O<sub>2</sub>C) исполнительного механизма

**Приложения.**  
**Текст управляющих файлов и таблицы настройки блоков**

## Приложение А1

Текст управляющего файла для задачи «Маятник в опоре»

```

% Масса маятника
m=0.2;
% Длина нити
l=0.5;
% Моменты инерции
Jz=m*l^2;
Jx=Jz;
Jy=0;
% Тензор инерции
J=[Jx 0 0;0 Jy 0;0 0 Jz];
% строка указания рабочей модели
sim('PendSimple')
% Получение данных
t=tout;
position=yout(:,1);
velocity=yout(:,2);
acceleration=yout(:,3);
figure;
% Построение графиков
subplot(1,1,1);
plot(t,position,'-
.k',t,velocity,'k',t,acceleration,':k','linewidth',2), % grid
on;
%set(gca,'fontsize',10);
title('Характеристики маятника');
xlabel('Время, с');
ylabel('grad, grad/s, grad/s^2');
legend('position',0,'velocity',0,'acceleration',0);

```

Таблица настройки блоков

Табл. А1.1. Настройки блока Machine Environment

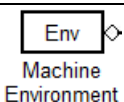
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>

Табл. А1.2. Настройки блоков Ground

	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
	Show Machine Environment port		

Табл. А1.3. Настройки блоков Body

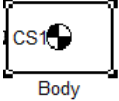
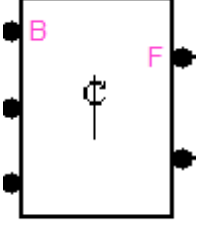
	Body		
	Массовые характеристики		
	Масса	m	kg
	Инерция	J	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[0 -1 0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	Ориентация		
	CG	[0 0 0]	deg
	CS1	[0 0 0]	deg
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
	Подключение	CS1-CS2	

Табл. А1.4. Настройки блоков Joints

	Revolute			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World

## Приложение А2

Текст управляющего файла для задачи «кривошипно-ползунный механизм»

```

clc
% Длины звеньев
l1=0.01;
l2=0.030;
% массы звеньев
m1=0.030;
m2=0.008;
m3=3.2;
r1=4*l1;
% инерционные параметры
I1=m1*r1^2/2;
I2=0.1*m2*l2^2;
I2=0.1*m2*l2^2;
J1=[0 0 0;0 0 0;0 0 I1];
J2=[0 0 0;0 0 0;0 0 I2];
fi1=90*pi/180;
fi2=acos(sqrt((l2^2-l1^2+(l1*cos(fi1))^2)/l2^2));
W=pi/30*60; % значение блоков Ramp и Constant в строках Slope и
Constant Value должны совпадать
l1s=0;
l2s=0.003;
sim('Krivoship')
% Получение данных
t=tout;
position=yout(:,1);
velocity=yout(:,2);
figure;% Построение графиков
subplot(1,1,1);
plot(t,position,'-.k',t,velocity,'k','linewidth',2), % grid
on;
%set(gca,'fontsize',10);
title('Движение ползуна');
xlabel('Время, с');
ylabel('m, m/s');
legend('position',0,'velocity',0);

```

Таблицы настройки блоков

Табл. А2.1. Настройки блока Machine Environment

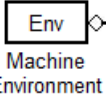
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>

Табл. А2.2. Настройки блоков Ground

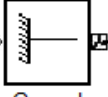
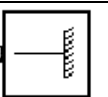
	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
	Ground1		
	Положение	[0 0 0]	m
Ground1	Show Machine Environment port		

Табл. А2.3. Настройки блоков Body

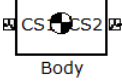
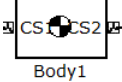
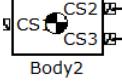
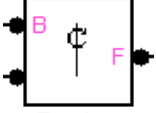
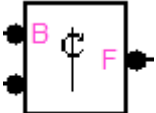
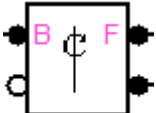
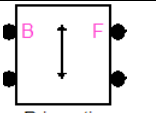
 Body	Body		
	Массовые характеристики		
	Масса	m1	kg
	Инерция	J1	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[l1*cos(fi1)/2 l1*sin(fi1)/2 0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[l1*cos(fi1) l1*sin(fi1) 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1-CS2		
 Body1	Body1		
	Массовые характеристики		
	Масса	m2	kg
	Инерция	J2	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2)/2 l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2)/2 0]	m
	CS1	[l1*cos(fi1) l1*sin(fi1) 0]	m
	CS2	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2) l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2) 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1-CS2		
 Body2	Body2		
	Массовые характеристики		
	Масса	m3	kg
	Инерция	J3	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2) l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2) 0]	m
	CS1	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2) l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2) 0]	m
	CS2	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2) l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2) 0]	m
	CS3	[l1*cos(fi1)+l2*cos(fi2) l1*sin(fi1)-l2*sin(fi2) 0]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1-CS2		

Табл. А2.4. Настройки блоков Joints

 Revolute	Revolute			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World
 Revolute1	Revolute1			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World
 Revolute2	Revolute2			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World
 Prismatic	Prismatic			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS1	World

## Приложение А3

Текст управляющего файла для задачи «Механизм с зубчатым зацеплением»

```

clc
clear
z1=20;z2=60;z21=20;z3=42; % Число зубьев
m=1; % модуль расчетный

% диаметры делительных окружностей
d1=m*z1;d2=m*z2;d21=m*z21;d3=m*z3;
% межосевые расстояния
a12=0.5*(d1+d2)/10^3;
a23=0.5*(d21+d3)/10^3;
a13=a12+a23;
b=3;gm=7.8e-6;
mv=pi/4*b*gm;m1=mv*d1^2;m2=mv*d2^2;m21=mv*d21^2;m3=mv*d3^2;

I1=m1*d1^2/8*1e-6;I2=m2*d2^2/8*1e-6;
I21=m21*d21^2/8*1e-6;I3=m3*d3^2/8*1e-6;I0=500*I1;Ic=40*I3;
i12=z2/z1;i23=z3/z21;i13=i12*i23;
I=I0+I1+(I2+I21)/i12^2+(I3+Ic)/i13^2;
J1=[0 0 0;0 0 0;0 0 I1+I0];J2=[0 0 0;0 0 0;0 0 I2+I21];
J3=[0 0 0;0 0 0;0 0 I3+Ic];

% автоматический запуск модели gear
sim('gear')

% Получение данных
t=tout;
velocity_Z1=yout(:,1);
velocity_Z2=yout(:,2);
velocity_Z3=yout(:,3);

figure;

% Построение графиков
subplot(1,1,1);
plot(t,velocity_Z1,'k',t,velocity_Z2,'-
.k',t,velocity_Z3,':k','linewidth',2), grid on;
%set(gca,'fontsize',10);
title('Характеристики зубчатого механизма');
xlabel('Время, с');
ylabel('rad/s');
legend('Angular velocity-Z_1',0,'Angular velocity-
Z_2',0,'Angular velocity-Z_3',0);

```

### Таблицы настройки блоков

Табл. А3.1. Настройки блока Machine Environment

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Env</div>	Machine Environment		
Machine Environment	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>



Табл. А3.2. Настройки блоков Ground




 Ground1	Ground1		
	Положение	[0 0 0]	m
Show Machine Environment port			
 Ground2	Ground2		
	Положение	[a12 0 0]	m
 Ground3	Ground3		
	Положение	[a13 0 0]	m

Табл. А3.3. Настройки блоков Body

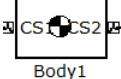
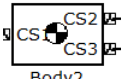
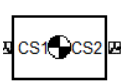
 Body1	Body1		
	Массовые характеристики		
	Масса	m1	kg
	Инерция	J1	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[0 0 0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[0 0 0]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1-CS2		
 Body2	Body2		
	Массовые характеристики		
	Масса	m2+m21	kg
	Инерция	J2	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[a12 0 0]	m
	CS1	[a12 0 0]	m
	CS2	[a12 0 0]	m
	CS3	[a12 0 0]	m
Визуализация			
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1-CS3		
 Body3	Body3		
	Массовые характеристики		
	Масса	m3	kg
	Инерция	J3	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[a13 0 0]	m
	CS1	[a13 0 0]	m
	CS2	[a13 0 0]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1-CS2		

Табл. А3.4. Настройки блоков Joints

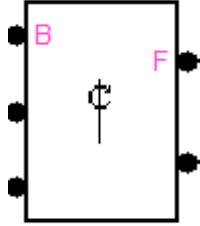
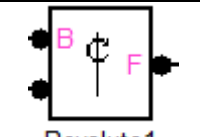
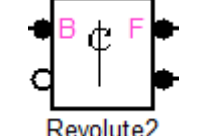
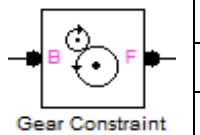
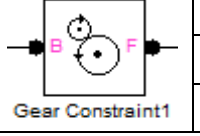
 <p>Revolute</p>	Revolute			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World
 <p>Revolute1</p>	Revolute1			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World
 <p>Revolute2</p>	Revolute2			
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS1	World

Табл. А3.5. Настройки блоков Gear Constraint

 <p>Gear Constraint</p>	Gear Constraint		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	d1/2000	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	d2/2000	m
 <p>Gear Constraint1</p>	Gear Constraint1		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	d21/2000	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	d3/2000	m

## Приложение А4

Текст управляющего файла для задачи «устройство УИСАТ»

d3=0.040;% (м) % диаметр шкива 3  
d4=0.053;% (м) % диаметр шкива 4  
d6=0.045;% (м) % диаметр шкива 6  
d7=0.071;% (м) % диаметр шкива 7  
dz9=0.096;% (м) % диаметр делительной окружности зубчатого колеса 9  
dz10=0.096;% (м) % диаметр делительной окружности зубчатого колеса 10  
dz23=0.064;% (м) % диаметр делительной окружности зубчатого колеса 23  
m=1;% модуль зацепления зубчатых колес  
Lol1a=0.024;% (м) % длина звена\* O1A (кривошип)  
Lab=0.106;% (м) % длина звена\* АВ (шатун 24)  
Lbo2=0.038;% (м) % длина звена\* BO2 (коромысло 25)  
Lo2c=0.0480574;% (м) % длина звена\* O2C (переключатель 27)  
Lsab=0.053;% (м) % центр масс звена АВ (шатун 24)  
Lsbo2=0.019;% (м) % центр масс звена BO2 (коромысло 25)  
Lso2c=0.0240287;% (м) % центр масс звена O2C (переключатель 27)

% \* - расстояние между двумя шарнирами  
Lval8=0.04;% (м) % длина вала 8  
Lval11=0.04;% (м) % длина вала 11  
Los26=0.054;% (м) % длина оси 26  
Lol1=0.01;% (м) % длина звена для демонстрации кривошипа O1A  
Lsva18=0.02;% (м) % центр масс вала 8  
Lsva11=0.02;% (м) % центр масс вала 11  
Lsos26=0.027;% (м) % центр масс оси 26  
Lsol1=0.005;% (м) % центр масс звена для демонстрации кривошипа O1A  
dval8=0.010;% (м) % диаметр вала 8  
dval11=0.010;% (м) % диаметр вала 11  
dos26=0.005;% (м) % диаметр оси 26  
ddisk12=0.096;% (м) % диаметр диска 12  
ddisk13=0.096;% (м) % диаметр диска 13  
dol1=0.001;% (м) % диаметр звена для демонстрации кривошипа O1A  
md3=29.2\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса шкива 3  
md4=45.1\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса шкива 4  
md6=34.6\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса шкива 6  
md7=39.5\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса шкива 7  
mz9=293.7\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса зубчатого колеса 9  
mz10=293.7\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса зубчатого колеса 10  
mz23=110.7\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса зубчатого колеса 23  
mola=81.7\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса звена O1A (кривошип)  
mab=10.1\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса звена АВ (шатун 24)  
mbo2=7.5\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса звена BO2 (коромысло 25)  
mo2c=9.5\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса звена O2C (переключатель 27)  
mdisk12=144.4\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса диска 12  
mdisk13=144.4\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса диска 13  
mval8=176\*10<sup>-3</sup>;% (кг) % масса вала 8

```

mval11=176*10^-3;%(кг)% масса вала 11
mos26=42*10^-3;%(кг)% масса оси 26
mo1=22*10^-3;%(кг)% принимается масса вала 18
md4d6=md4+md6;%(кг)% масса шкивов 4 и 6
md7z9=md7+mz9;%(кг)% масса шкива 7 и зубчатого колеса 9
% координаты для позиционирования импортированных файлов**
xo2c=-0.04;%(м)% переключателя 27 по x
yo2c=-0.0184;%(м)% переключателя 27 по y
xdisk12=-0.048;%(м)% диска 12 по x
ydisk12=-0.048;%(м)% диска 12 по y
xdisk13=-0.048;%(м)% диска 13 по x
ydisk13=-0.048;%(м)% диска 13 по y
xd3=-0.02;%(м)% шкива 3 по x
yd3=-0.02;%(м)% шкива 3 по y
xd4d6=-0.0265;%(м)% шкивов 4 и 6 по x
yd4d6=-0.0265;%(м)% шкивов 4 и 6 по y
zd4d6=-0.005;%(м)% шкивов 4 и 6 по z
xd7z9=-0.048;%(м)% шкива 7 и зубчатого колеса 9 по x
yd7z9=-0.048;%(м)% шкива 7 и зубчатого колеса 9 по y
zd7z9=-0.005;%(м)% шкива 7 и зубчатого колеса 9 по z
xz10=-0.048;%(м)% зубчатого колеса 10 по x
yz10=-0.048;%(м)% зубчатого колеса 10 по y
xz23=-0.032;%(м)% зубчатого колеса 23 по x
yz23=-0.032;%(м)% зубчатого колеса 23 по y
%** - для наглядности демонстрации модели simmechanics
используются упрощенные 3-D модели некоторых звеньев (шкивы
3,4,6,7; зубчатые колеса 9,10,23; диски 12 и 13; переключатель
27). Модели импортированы из SolidWorks в формате *.stl
%углы и координаты для задания первоначального положения
механизма
x02=-0.1046;%(м)% координаты точки 02
y02=0.0366;%(м)% координаты точки 02
A2=-2*y02*Lab;
B2=-2*Lab*(x02-L01a);
C2=x02*x02+L01a*L01a+Lab*Lab+y02*y02-Lbo2*Lbo2-2*x02*L01a;
f2=2*atan((-A2+sqrt(A2*A2+B2*B2-C2*C2))/(C2-B2)); %угол fi2
A1=2*y02*Lbo2;
B1=2*Lbo2*(x02-L01a);
C1=x02*x02+L01a*L01a+Lbo2*Lbo2+y02*y02-Lab*Lab-2*x02*L01a;
f3=2*atan((-A1-sqrt(A1*A1+B1*B1-C1*C1))/(C1-B1)); %угол fi3
f4=3*pi/4; %угол fi4
f5=4*pi/6; %угол fi5

%Данные для моделирования зубчатых колес
%Для SimMechanics шкивы заменяются эквивалентными зубчатыми
колесами (под эквивалентным понимается зубчатое колесо,
обеспечивающее необходимую угловую скорость на валу).
ad3d4=0.092;%(м)% межосевое расстояние для шкивов 3 и 4
ad6d7=0.095;%(м)% межосевое расстояние для шкивов 6 и 7
i12=d4/d3; % передаточное отношение шкивов 3 и 4

```

$i_{23}=d_7/d_6$ ; % передаточное отношение шкивов 6 и 7  
 $i_{34}=d_{z10}/d_{z9}$ ; % передаточное отношение зубчатых колес 9 и 10  
 $i_{45}=d_{z23}/d_{z10}$ ; % передаточное отношение зубчатых колес 10 и 23  
 $i_{15}=i_{12}*i_{23}*i_{34}*i_{45}$ ; % передаточное отношение для расчета  
 угловой скорости на валу 18  
 $e_{qrd3}=ad_{3d4}/(i_{12}+1)$ ; % (м) % эквивалентный делительный радиус шкива  
 3  
 $e_{qrd4}=ad_{3d4}*i_{12}/(i_{12}+1)$ ; % (м) % эквивалентный делительный радиус  
 шкива 4  
 $e_{qrd6}=ad_{6d7}/(i_{23}+1)$ ; % (м) % эквивалентный делительный радиус шкива  
 6  
 $e_{qrd7}=ad_{6d7}*i_{23}/(i_{23}+1)$ ; % (м) % эквивалентный делительный радиус  
 шкива 7  
 $r_{z9}=m*d_{z9}/2$ ; % (м) % делительный радиус зубчатого колеса 9  
 $r_{z10}=m*d_{z10}/2$ ; % (м) % делительный радиус зубчатого колеса 10  
 $r_{z23}=m*d_{z23}/2$ ; % (м) % делительный радиус зубчатого колеса 23  
 $az_{9z10}=r_{z9}+r_{z10}$ ; % (м) % межосевое расстояние для зубчатых колес 9  
 и 10  
 $az_{10z23}=r_{z10}+r_{z23}$ ; % (м) % межосевое расстояние для зубчатых колес  
 10 и 23

$rd_3=d_3/2$ ; % (м) % радиус шкив 3  
 $rd_4=d_4/2$ ; % (м) % радиус шкив 4  
 $rd_6=d_6/2$ ; % (м) % радиус шкив 6  
 $rd_7=d_7/2$ ; % (м) % радиус шкив 7  
 $rd_{z9}=d_{z9}/2$ ; % (м) % радиус зубчатого колеса 9  
 $rd_{z10}=d_{z10}/2$ ; % (м) % радиус зубчатого колеса 10  
 $rd_{z23}=d_{z23}/2$ ; % (м) % радиус зубчатого колеса 23  
 $r_{val8}=d_{val8}/2$ ; % (м) % радиус вала 8  
 $r_{val11}=d_{val11}/2$ ; % (м) % радиус вала 11  
 $ros_{26}=d_{os26}/2$ ; % (м) % радиус оси 26  
 $rdisk_{12}=ddisk_{12}/2$ ; % (м) % радиус диска 12  
 $rdisk_{13}=ddisk_{13}/2$ ; % (м) % радиус диска 13  
 $rol=d_{o1}/2$ ; % радиус звена для демонстрации кривошипа O1A

$I_{d3}=(m_{d3}*rd_3^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции шкива 3  
 $I_{d4}=(m_{d4}*rd_4^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции шкива 4  
 $I_{d6}=(m_{d6}*rd_6^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции шкива 6  
 $I_{d7}=(m_{d7}*rd_7^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции шкива 7  
 $I_{z9}=(m_{z9}*rd_{z9}^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции зубчатого колеса 9  
 $I_{z10}=(m_{z10}*rd_{z10}^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции зубчатого колеса  
 10  
 $I_{z23}=(m_{z23}*rd_{z23}^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции зубчатого колеса  
 23  
 $I_{o1a}=(m_{o1a}*l_{o1a}^2)/2$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции звена O1A  
 (кривошип)  
 $I_{ab}=(1/3)*m_{ab}*(l_{ab}^2)$ ; % (кг\*м<sup>2</sup>) % момент инерции звена АВ (шатун  
 24)

```

Ibo2=(1/3)*mbo2*(Lbo2^2);%(кг*м2)% момент инерции звена B02
(коромысло 25)
Io2c=(1/3)*mo2c*(Lo2c^2);%(кг*м2)% момент инерции звена O2C
(переключатель 27)
Ival8=(mval8*rval8^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции вала 8
Ival11=(mval11*rval11^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции вала 11
Ios26=(mos26*ros26^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции оси 26
Idisk12=(mdisk12*rdisk12^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции диска 12
Idisk13=(mdisk13*rdisk13^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции диска 13
Io1=(mol*rol^2)/2;%(кг*м2)% момент инерции звена для
демонстрации кривошипа O1A

```

```

Id4d6=Id4+Id6;%(кг*м2)% момент инерции шкива 4 и 6
Id7z9=Id7+Iz9;%(кг*м2)% момент инерции шкива 7 и зубчатого
колеса 9

```

```

%тензоры инерции звеньев

```

```

I1=[0 0 0;0 0 0;0 0 Id3]; % тензор инерции шкива 3
I2=[0 0 0;0 0 0;0 0 Id4d6]; %тензор инерции шкива 4 и 6
I3=[0 0 0;0 0 0;0 0 Id7z9]; %тензор инерции шкива 7 и зубчатого
колеса 9
I4=[0 0 0;0 0 0;0 0 Iz10]; %тензор инерции зубчатого колеса 10
I5=[0 0 0;0 0 0;0 0 Iz23]; %тензор инерции зубчатого колеса 23
I6=[0 0 0;0 0 0;0 0 Iola]; %тензор инерции звена O1A (кривошип)
I7=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Iab]; %тензор инерции звена AB (шатун 24)
I8=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Ibo2]; %тензор инерции звена B02
(коромысло 25)
I9=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Io2c]; %тензор инерции звена O2C
(переключатель 27)
I10=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Ival8]; %тензор инерции вала 8
I11=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Ival11]; %тензор инерции вала 11
I12=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Ios26]; %тензор инерции оси 26
I13=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Idisk12]; %тензор инерции диска 12
I14=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Idisk13]; %тензор инерции диска 13
I15=[0 0 0; 0 0 0; 0 0 Io1]; %тензор инерции звена для
демонстрации кривошипа O1A

```

```

%нагрузка приложенная к переключателю (момент силы)

```

```

r=0.0440782; %м
m=5*10^-3; %кг
g=9.8; %м/с^2
alpha=0.426; %рад
alpha1=0.0431; %рад
M= m*g*sin(alpha)*r*sin(alpha1);

```

```

%Кинематический привод

```

```

V=-2.5128;%(рад/с)% скорость для кинематического привода
a=0;%(рад/с^2)% ускорение для кинематического привода

```

---

Фрагмент текст управляющего файла для задачи «устройство УИСАТ» из раздела 5  
Моделирование двигателей пример 2.

---

```
%Двигатель
Ky=6; % коэффициент усиления усилителя мощности
Ty=0.0000025; % постоянная времени усилителя мощности
J=0.00000023; % (кг*м^2) % момент инерции ротора
Qc=0; % угол поворота ротора относительно системы координат
статора (в электрических градусах)
Pn=8; % число пар полюсов
Cd=0.082; % машинный коэффициент двигателя
T1=0.000065; % (с) % постоянная времени статорной обмотки
R1=5; % (Ом) % сопротивление фазы обмотки статора
L1=T1/R1; % Индуктивность статора
w=1/R1;
Mc=0.008; % момент сопротивления при обесточенных обмотках
(момент трения)

%sim('mehanizm_prog_dissert_model') % запуск модели с
кинематическим приводом
sim('mehanizm_prog_dissert_model_dvig') % запуск модели с
синхронным двигателем

% данные с датчика 1
figure; % создание графического объекта
scrsz = get(0,'ScreenSize'); % получение размера экрана
set(gcf,'Position',[1 1 scrsz(3) scrsz(4)]); % создание рисунка
под размер экрана расположенного в верхнем левом углу

subplot(3,3,1); % расположение графиков на рисунке
plot(t,phil, 'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
phil(t)
title('Угол'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\phi_1, рад'); % название оси y

subplot(3,3,2); % расположение графиков на рисунке
plot(t,omegal, 'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
omegal(t)
title('Угловая скорость'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\omega_1, рад/с'); % название оси y

subplot(3,3,3); % расположение графиков на рисунке
plot(t,Fr1x,'--k',t,Fr1y,':k',t,Fr1z,'-k','linewidth',2); %grid
on; % построение графиков Fr1(t)
h = legend('Fr1x','Fr1y','Fr1z','NorthEastOutside',2); %подпись
легенды
title('Сила реакции по оси примитива'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('Fr_1, Н*м'); % название оси y
```

```

saveas(gcf,'phi_1','emf'); %сохранение графического объекта под
именем "phi_1" в формате "emf"

% данные с датчика 2
figure; % создание графического объекта
scrsz = get(0,'ScreenSize'); % получение размера экрана
set(gcf,'Position',[1 1 scrsz(3) scrsz(4)]); % создание рисунка
под размер экрана расположенного в верхнем левом углу

subplot(3,3,1); % расположение графиков на рисунке
plot(t,phi2,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
phi2(t)
title('Угол'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\phi_2, рад'); % название оси y

subplot(3,3,2); % расположение графиков на рисунке
plot(t,omega2,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
omega2(t)
title('Угловая скорость'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\omega_2, рад/с'); % название оси y

subplot(3,3,3); % расположение графиков на рисунке
plot(t,Fr2x,'--k',t,Fr2y,':k',t,Fr2z,'-k','linewidth',2); %grid
on; % построение графиков Fr2(t)
h = legend('Fr2x','Fr2y','Fr2z','NorthEastOutside',2); %подпись
легенды
title('Сила реакции по оси примитива'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('Fr_2, Н*м'); % название оси y

saveas(gcf,'phi_2','emf'); %сохранение графического объекта под
именем "phi_2" в формате "emf"

% данные с датчика 3
figure; % создание графического объекта
scrsz = get(0,'ScreenSize'); % получение размера экрана
set(gcf,'Position',[1 1 scrsz(3) scrsz(4)]); % создание рисунка
под размер экрана расположенного в верхнем левом углу

subplot(3,3,1); % расположение графиков на рисунке
plot(t,phi3,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
phi3(t)
title('Угол'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\phi_3, рад'); % название оси y

subplot(3,3,2); % расположение графиков на рисунке

```



```

plot(t,omega3,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
omega3(t)
title('Угловая скорость'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\omega_3, рад/с'); % название оси y

subplot(3,3,3); % расположение графиков на рисунке
plot(t,Fr3x,'--k',t,Fr3y,':k',t,Fr3z,'-k','linewidth',2); %grid
on; % построение графиков Fr3(t)
h = legend('Fr3x','Fr3y','Fr3z','NorthEastOutside',2); %подпись
легенды
title('Сила реакции по оси примитива'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('Fr_3, Н*м'); % название оси y

saveas(gcf,'phi_3','emf'); %сохранение графического объекта под
именем "phi_3" в формате "emf"

% данные с датчика 4
figure; % создание графического объекта
scrsz = get(0,'ScreenSize'); % получение размера экрана
set(gcf,'Position',[1 1 scrsz(3) scrsz(4)]); % создание рисунка
под размер экрана расположенного в верхнем левом углу

subplot(3,3,1); % расположение графиков на рисунке
plot(t,phi4,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
phi4(t)
title('Угол'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\phi_4, рад'); % название оси y
subplot(3,3,2); % расположение графиков на рисунке
plot(t,omega4,'k','linewidth',2); %grid on; % построение графика
omega4(t)
title('Угловая скорость'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('\omega_4, рад/с'); % название оси y
subplot(3,3,3); % расположение графиков на рисунке
plot(t,Fr4x,'--k',t,Fr4y,':k',t,Fr4z,'-k','linewidth',2); %grid
on; % построение графиков Fr4(t)
h = legend('Fr4x','Fr4y','Fr4z','NorthEastOutside',2); %подпись
легенды
title('Сила реакции по оси примитива'); % название графика
xlabel('t, с'); % название оси x
ylabel('Fr_4, Н*м'); % название оси y
saveas(gcf,'phi_4','emf'); %сохранение графического объекта под
именем "phi_4" в формате "emf"

```

Параметры настройки основных блоков для структурной модели SimMechanics (Simulink / MatLab) исполнительного механизма плетения с кинематическим приводом и синхронным двигателем приведены в таблицах А4.1 – А4.4. Настройки блоков.

Табл. А4.1. Настройки блока Machine Environment

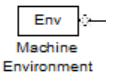
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 0 -9.81]	m/s <sup>2</sup>

Табл. А4.2. Настройки блоков Ground











	Ground		
	Положение	[az10z23*cos(f4)-az9z10+ad6d7*cos(f5) az10z23*sin(f4)+ad6d7*sin(f5)+ad3d4 0]	m
Show Machine Environment port			
	Ground 1		
	Положение	[az10z23*cos(f4)-az9z10+ad6d7*cos(f5) az10z23*sin(f4)+ad6d7*sin(f5) 0]	m
	Ground 2		
	Положение	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) 0]	m
	Ground 3		
	Положение	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lval8]	m
	Ground 4		
	Положение	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lval11]	m
	Ground 5		
	Положение	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m
	Ground 6		
	Положение	[0 0 0]	m
	Ground 7		
	Положение	[0 0 -Lo1]	m
	Ground 8		
	Положение	[x02 y02 -Lo1]	m
	Ground 9		
	Положение	[x02 y02 -Lo1+Los26]	m

Табл. А4.3. Настройки блоков Body

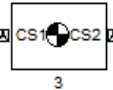
	body 3		
	Массовые характеристики		
	Масса	md3	kg
	Инерция	I1	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[az10z23*cos(f4)-az9z10+ad6d7*cos(f5) az10z23*sin(f4)+ad6d7*sin(f5)+ad3d4 0]	m
	CS1	[az10z23*cos(f4)-az9z10+ad6d7*cos(f5) az10z23*sin(f4)+ad6d7*sin(f5)+ad3d4 0]	m
	CS2	[az10z23*cos(f4)-az9z10+ad6d7*cos(f5) az10z23*sin(f4)+ad6d7*sin(f5)+ad3d4 0]	m

Табл. А4.3. Настройки блоков Body (Продолжение)


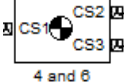
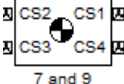
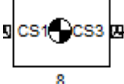
	CS3	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)+xd3$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5)+ad3d4+yd3 \quad 0]$	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
	Подключение	CS3	
	body 4 and 6		
	Массовые характеристики		
	Масса	md4d6	kg
	Инерция	I2	kg*m^2
	Положение		
	Порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5) \quad 0]$	m
	CS1	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5) \quad 0]$	m
	CS2	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5) \quad 0]$	m
	CS3	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5) \quad 0]$	m
	CS4	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+ad6d7*\cos(f5)+xd4d6$ $az10z23*\sin(f4)+ad6d7*\sin(f5)+yd4d6 \quad zd4d6]$	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
	Подключение	CS4	
	body 7 and 9		
	Массовые характеристики		
	Масса	md7d9	kg
	Инерция	I3	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10 \quad az10z23*\sin(f4) \quad 0]$	m
	CS1	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10 \quad az10z23*\sin(f4) \quad 0]$	m
	CS2	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10 \quad az10z23*\sin(f4) \quad 0]$	m
	CS3	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10 \quad az10z23*\sin(f4) \quad 0]$	m
	CS4	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10 \quad az10z23*\sin(f4) \quad 0]$	m
	CS5	$[az10z23*\cos(f4)-az9z10+xd7z9$ $az10z23*\sin(f4)+yd7z9 \quad zd7z9]$	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CS5		
	body 8		
	Массовые характеристики		
	Масса	mval8	kg

Табл. А4.3. Настройки блоков Body (Продолжение)


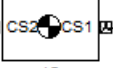
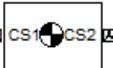

 8	Инерция	I10	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lsval8]	m
	CS3	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) 0]	m
	CS1	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lval8]	m
 12	body 12		
	Массовые характеристики		
	Масса	mdisk12	kg
	Инерция	I13	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lval8]	m
	CS1	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lval8]	m
	CS2	[az10z23*cos(f4)-az9z10 az10z23*sin(f4) Lval8]	m
	CS12	[az10z23*cos(f4)-az9z10+xdisk12 az10z23*sin(f4)+ydisk12 Lval8]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	External graphics file		
Подключение	CS12		
 13	body 13		
	Массовые характеристики		
	Масса	mdisk13	kg
	Инерция	I14	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lval11]	m
	CS1	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lval11]	m
	CS2	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lval11]	m
	CS3	[az10z23*cos(f4)+xdisk13 az10z23*sin(f4)+ydisk13 Lval11]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	External graphics file		
Подключение	CS3		
 11	body 11		
	Массовые характеристики		
	масса	mval11	kg
	Инерция	I11	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
CG	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lsval11]	m	
CS3	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) Lval11]	m	
CS1	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m	

Табл. А4.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

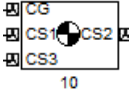
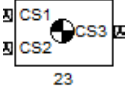
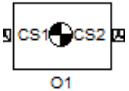
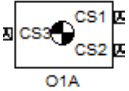
 10	body 10		
	Массовые характеристики		
	масса	mz10	kg
	Инерция	I4	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m
	CS1	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m
	CS2	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m
	CS3	[az10z23*cos(f4) az10z23*sin(f4) 0]	m
	CS4	[az10z23*cos(f4)+xz10 az10z23*sin(f4)+yz10 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CS4		
 23	body 7 and 9		
	Массовые характеристики		
	масса	md7d9	kg
	Инерция	I3	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[0 0 0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[0 0 0]	m
	CS3	[0 0 0]	m
	CS4	[xz23 yz23 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CS4		
 01	body O1		
	Массовые характеристики		
	Масса	mo1	kg
	Инерция	I15	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[0 0 -Lso1]	m
	CS1	[0 0 -Lo1]	m
CS2	[0 0 0]	m	
 01A	body O1A		
	Массовые характеристики		
	Масса	mo1a	kg
	Инерция	I6	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
CG	[0 0 -Lo1]	m	
CS1	[0 0 -Lo1]	m	

Табл. А4.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

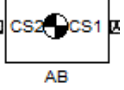
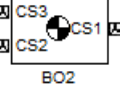
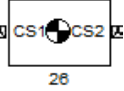
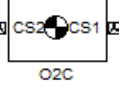
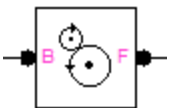
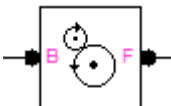
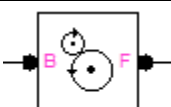
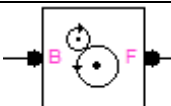
	CS2	[0 0 -Lo1]	m
	CS3	[Lo1a 0 -Lo1]	m
	body AB		
	Массовые характеристики		
	Масса	mab	kg
	Инерция	I7	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[Lo1a+Lsab*cos(f2) Lsab*sin(f2) -Lo1]	m
	CS1	[Lo1a 0 -Lo1]	m
	CS2	[Lo1a+Lab*cos(f2) Lab*sin(f2) -Lo1]	m
	body BO2		
	Массовые характеристики		
	Масса	mbo2	kg
	Инерция	I8	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[x02+Lsbo2*cos(f3) y02+Lsbo2*sin(f3) -Lo1]	m
	CS1	[Lo1a+Lab*cos(f2) Lab*sin(f2) -Lo1]	m
	CS2	[x02 y02 -Lo1]	m
CS3	[x02 y02 -Lo1]	m	
	body 26		
	Массовые характеристики		
	Масса	mos26	kg
	Инерция	I12	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[x02 y02 -Lo1+Lsos26]	m
	CS1	[x02 y02 -Lo1+Los26]	m
CS2	[x02 y02 -Lo1]	m	
	body O2C		
	Массовые характеристики		
	Масса	mo2c	kg
	Инерция	I9	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор происхождения позиции [x y z]	
	CG	[x02+Lso2c*cos(f3+pi) y02+Lso2c*sin(f3+pi) -Lo1+Los26]	m
	CS1	[x02 y02 -Lo1+Los26]	m
	CS2	[x02 y02 -Lo1+Los26]	m
	CS3	[x02+Lo2c*cos(f3+pi) y02+Lo2c*sin(f3+pi) -Lo1+Los26]	m
	CS24	[x02+xo2c y02+yo2c -Lo1+Los26]	m
Визуализация			
Геометрия тела	External graphics file		
Подключение	CS24		

Табл. А4.4. Настройки блоков Gear Constraint

 Gear Constraint	Gear Constraint		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	eqrd3	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	eqrd4	m
 Gear Constraint1	Gear Constraint1		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	eqrd6	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	eqrd7	m
 Gear Constraint2	Gear Constraint2		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	rz9	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	rz10	m
 Gear Constraint3	Gear Constraint3		
	Радиус делительной окружности ведущего колеса	rz10	m
	Радиус делительной окружности ведомого колеса	rz23	m

Положение – вектор происхождения позиции [x y z]

Если не указана визуализация, используются настройки по умолчанию  
Use machine default body geometry (default).

## Приложение Б1

Текст управляющего файла для задачи «двухпараметрическая антенна»

```
clc
gm1=2700;%материал отражателя (алюминий)
gm2=7800;%материал рычага
b=0.0025; % толщина рабочей поверхности
r1=0.21;% радиус антенны
m1=pi*r1^2*b*gm1;% масса антенны
% моменты инерции отражателя
I1z=m1*r1^2/2;
I1x=m1*r1^2/4;
I1y=I1x;
% координаты центра масс отражателя
X1=0.00109;
Y1=0.002365;
Z1=-0.00109;
i=r1*cos(45*pi/180); % Геометрический параметр
% длины звеньев
l2=0.125;
l3=0.09;
l4=l2;
l5=l3;
% радиусы звеньев
r2=0.006;
r3=0.004;
r5=r3;
% масса тяги поз 8 и поз.5
m2=gm2*pi*r2^2*l2;
m4=m2;
m3=gm2*pi*r3^2*l3;
m5=m3;
% моменты инерции звеньев
J1=[I1x 0 0;0 I1y 0;0 0 I1z];
I2z=m2*r2^2/2;
I2x=m2*l2^2/12;
I2y=I2x;
J2=[I2x 0 0;0 I2y 0;0 0 I2z];
I3z=m3*r3^2/2;
I3x=m3*l3^2/12;
I3y=I3x;
J3=[I3x 0 0;0 I3y 0;0 0 I3z];
I5x=m5*r5^2/2;
I5y=m5*l5^2/12;
I5z=I5y;
J5=[I5x 0 0;0 I5y 0;0 0 I5z];
I4z=I2z;
I4x=I2x;
I4y=I2y;
J4=[I4x 0 0;0 I4y 0;0 0 I4z];
% Координаты крепления с карданом
xA=0;
```



```

yA=0.85*r1;zA=0;
% Соединение с шаровой опорой
xB=0;yB=yA;
zB=l2;
% азимутальная ось. Соединение с карданом
xC=-yA;
yC=0;
zC=0;
% азимутальная ось. Соединение с шаровой опорой
xD=xC;
yD=yC;
zD=zB;
% соединение с двигателем 1
xo2=0;
yo2=yB-l3;
zo2=l2;
% соединение с двигателем 2
xo3=-yo2;
yo3=0;
zo3=zo2;
% параметры двигателя
%рабочая скорость перемещения зеркала (рад/сек)
w=2.1875;
% обороты на зеркале
n=21;
%амплитуда по углу
A1=62*pi/180;
%амплитуда скорости
Av=(62*pi/180)*n*pi/30;
% амплитуда по ускорению
Aa=-(62*pi/180)*(n*pi/30)^2;
Самостоятельно добавить автоматический запуск моделей и
построение графиков

```

### Таблица настройки основных блоков для задачи «трёхмассовая система»

Табл. Б1.1. Настройки блока Machine Environment

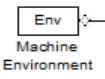
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>

Табл. Б1.2. Настройки блоков Ground

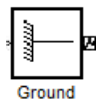
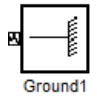

	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
	Show Machine Environment port		
	Ground 1		
	Положение	[xo3 yo3 zo3]	m
	No Show Machine Environment port		
	Ground 2		
	Положение	[xo2 yo2 zo2]	m
	No Show Machine Environment port		

Табл. Б1.3. Настройки блоков Body

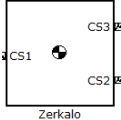

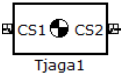
 <p>Zerkalo</p>	Zerkalo		
	Массовые характеристики		
	Масса	m1	kg
	Инерция	J1	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[X1 Y1 Z1 ]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[0 0.85*r1 0]	m
	CS3	[-0.85*r1 0 0]	m
	CS4	[0 r1 0]	m
	CS5	[-i i 0]	m
	CS6	[-r1 0 0]	m
	CS7	[-i -i 0]	m
	CS8	[0 -r1 0]	m
	CS9	[i -i 0]	m
	CS10	[r1 0 0]	m
	CS11	[i i 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1, CS2, CS3		
 <p>Tjaga2</p>	Tjaga2		
	Массовые характеристики		
	Масса	m4	kg
	Инерция	J4	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[xC yC l4/2]	m
	CS1	[xC yC zC]	m
	CS2	[xD yD zD]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
	Подключение	CS1,CS2	
 <p>Tjaga1</p>	Tjaga1		
	Массовые характеристики		
	Масса	m2	kg
	Инерция	J2	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[xA yA l2/2]	m
	CS1	[xA yA zA]	m
	CS2	[xB yB zB]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1,CS2		

Табл. Б1.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

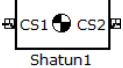
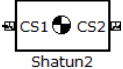
 Shatun1	Shatun1			
	Массовые характеристики			
	Масса	m3	Масса	
	Инерция	J3	Инерция	
	Положение			
	порт	Вектор положения точки тела [x y z]		
	CG	[0 yo2+l3/2 zo3]	m	
	CS1	[xB yB zB]	m	
	CS2	[xo2 yo2 zo2]	m	
	Визуализация			
	Геометрия тела	Use machine default body geometry		
	Подключение	CS1,CS2		
 Shatun2	Shatun2			
	Массовые характеристики			
	Масса	m5	Масса	
	Инерция	J5	Инерция	
	Положение			
	порт	Вектор положения точки тела [x y z]		
	CG	[xD+l5/2 0 zo3]	m	
	CS1	[xD yD zD]	m	
	CS2	[xo3 yo3 zo3]	m	
	Визуализация			
	Геометрия тела	Use machine default body geometry		
	Подключение	CS1,CS2		

Табл. Б1.4. Настройки блоков Joints

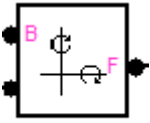
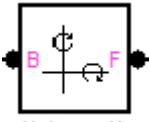
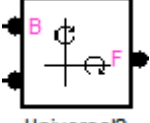

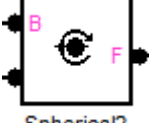
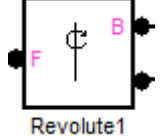
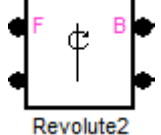
 Universal	Universal			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS	World
 Universal1	Universal1			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS	World
 Universal2	Universal 2			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS	World
 Spherical1	Spherical1			
	Ось движения	N/A	Referens CS	N/A
 Spherical2	Spherical2			
	Ось движения	N/A	Referens CS	N/A

Табл. Б1.4. Настройки блоков Joints (Продолжение)

 <p>Revolute1</p>	Revolute1			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
 <p>Revolute2</p>	Revolute2			
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS	World

## Приложение Б2

### Текст управляющего файла для задачи «Робот-манипулятор с захватом»

```

%Очистка памяти
clc
clear all
%%Модель робота с захватом
%Геометрические параметры звеньев
h0=1; hm=5;
l0=0.2; l1=1.5; l2=1.2; l3=0.3; l4=0.4; l5=0.8;
a1=asin(l4/l5);
X=1.3; Y=1.5; Z=4; T=12; w=2*pi/T;
R=sqrt(X^2+Y^2);
fi0=2*atan(Y/(X+R));
fi3=0;
%Функция поиска минимума
x=fminsearch(@(x) SimMechRobotSharnirFunc(x,...
    l0,l1,l2,l3,R,Z,fi3), [1;0;0]);
h=x(1)-h0;
fi1=-x(2); fi2=-(x(3)-x(2)); fi3r=-(fi3-x(3));
%Коэффициенты умножения для двигателей
Az=h*w^2/2;
A0=fi0*w^2/2;
A1=fi1*w^2/2;
A2=fi2*w^2/2;
A3=fi3r*w^2/2;
A4=90*pi/180*w^2/2;
A5=40*pi/180*(2*w)^2/2;
Текст функции SimMechRobotSharnirFunc для управляющего файла
%Функция
function F=SimMechRobotSharnirFunc(x,l0,l1,l2,l3,R,Z,fi3)
F=(l0+l1*cos(x(2))+l2*cos(x(3))+l3*cos(fi3)-R)^2+...
(x(1)+l1*sin(x(2))+l2*sin(x(3))+l3*sin(fi3)-Z)^2;
Самостоятельно добавить автоматический запуск моделей и
построение графиков

```

Параметры настройки основных блоков для структурной модели SimMechanics (Simulink / MatLab) робота с захватом приведены в таблицах Б2.1 – Б2.4. Настройки блоков.

Табл. Б2.1. Настройки блока Machine Environment

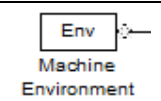
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 0 -9.81]	m/s <sup>2</sup>

Табл. Б2.2. Настройки блока Ground

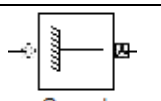
	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
	Show Machine Environment port		

Табл. Б2.3. Настройки блоков Body

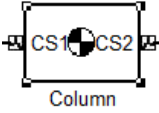

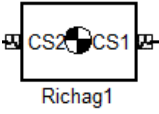
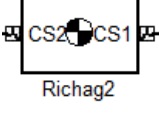
	Column		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[0 0 h0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[0 0 hm]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1, CS2		
	Podjem		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[0 0 h0]	m
	CS1	[0 0 h0]	m
	CS2	[10 0 h0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1, CS2		
	Richag1		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[10+11/2 0 h0]	m
	CS1	[10 0 h0]	m
	CS2	[10+11 0 h0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CS1, CS2		
	Richag2		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[10+11+12/2 0 h0]	m
CS3	[10+11 0 h0]	m	
CS1	[10+11+12 0 h0]	m	

Табл. Б2.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

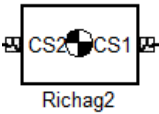
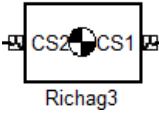
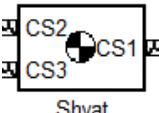
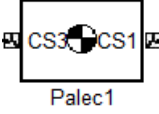
 Richag2	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
	Подключение	CS1, CS2	
 Richag3	Richag3		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[l0+l1+l2+l3/2 0 h0]	m
	CS1	[l0+l1+l2 0 h0]	m
	CS2	[l0+l1+l2+l3 0 h0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1, CS2		
 Shvat	Shvat		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[l0+l1+l2+l3 0 h0 ]	m
	CS1	[l0+l1+l2+l3 0 h0 ]	m
	CS2	[l0+l1+l2+l3 0 h0+l4]	m
	CS3	[l0+l1+l2+l3 0 h0-l4]	
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1, CS2, CS3		
 Palc1	Palc1		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[l0+l1+l2+l3 0 h0+l4]	m
	CS1	[l0+l1+l2+l3 0 h0+l4]	m
	CS2	[l0+l1+l2+l3+l5*cos(al) 0 h0]	
	CS3	[l0+l1+l2+l3 0 h0+l4]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	Use machine default body geometry		
Подключение	CS1, CS3		

Табл. Б2.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

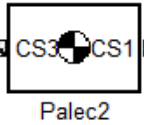
	Palc2		
	Массовые характеристики		
	Масса	1	kg
	Инерция	eye(3)	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[10+11+12+13 0 h0-14]	m
	CS1	[10+11+12+13 0 h0-14]	m
	CS2	[10+11+12+13+15*cos(al) 0 h0]	
	CS3	[10+11+12+13 0 h0-14]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1, CS3		

Табл. Б2.4. Настройки блоков Joints

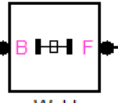
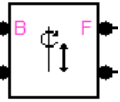
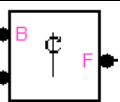
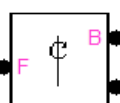
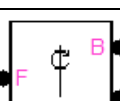
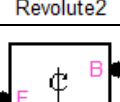

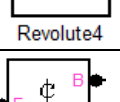
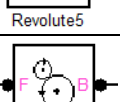






	Weld		
	Ось движения	[0 0 0]	Referens CS World
	Cylindrical		
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS World
	Revolute		
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS World
	Revolute1		
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS World
	Revolute2		
	Оси движения	[0 1 0]	Referens CS World
	Revolute3		
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS World
	Revolute4		
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS World
	Revolute5		
	Ось движения	[0 1 0]	Referens CS World
	Gear Constraint 1		
	Радиус делительной окружности ведущего и ведомого колес	0,4 и 0,4	



Табл. Б2.5. Настройки блоков Sine Wave

 Sine Wave	Sine Wave	
	Амплитуда	$-1/w^2$
	Смещение	$1/w^2$
	Частота	$w$
	Фаза	$\pi/2$
	Частота дискретизации	0
 Sine Wave1	Sine Wave1	
	Амплитуда	$1/w$
	Смещение	0
	Частота	$w$
	Фаза	0
	Частота дискретизации	0
 Sine Wave2	Sine Wave2	
	Амплитуда	1
	Смещение	0
	Частота	$w$
	Фаза	$\pi/2$
	Частота дискретизации	0
 Sine Wave3	Sine Wave3	
	Амплитуда	$-A5/(2*w)^2$
	Смещение	$A5/(2*w)^2$
	Частота	$2*w$
	Фаза	$\pi/2$
	Частота дискретизации	0
 Sine Wave4	Sine Wave4	
	Амплитуда	$A5/(2*w)$
	Смещение	0
	Частота	$2*w$
	Фаза	0
	Частота дискретизации	0
 Sine Wave5	Sine Wave5	
	Амплитуда	$A5$
	Смещение	0
	Частота	$2*w$
	Фаза	$\pi/2$
	Частота дискретизации	0

### Приложение Б3

Текст управляющего файла для задачи «Узел полировки оптических

Табл. Б3.1. Настройки блока Machine Environment

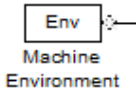
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 0 -9.81]	m/s <sup>2</sup>

Табл. Б2.2. Настройки блока Ground

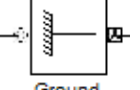
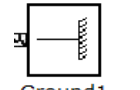
	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
	Show Machine Environment port		
	Ground		
	Положение	[12 0 11-13-14-15]	m

Табл. Б3.3. Настройки блоков Body


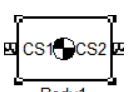
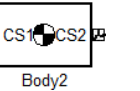
	Body		
	Массовые характеристики		
	Масса	m1	kg
	Инерция	I1	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[0 0 11/2]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[0 0 11]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CG		
	Body1		
	Массовые характеристики		
	Масса	m21	kg
	Инерция	I2	kg*m <sup>2</sup>
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[12/2 0 11]	m
	CS1	[0 0 11]	m
	CS2	[12 0 11]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CG		
	Body2		
	Массовые характеристики		
	Масса	m3	kg
	Инерция	I3	kg*m <sup>2</sup>

Табл. Б3.3. Настройки блоков Body (Продолжение)


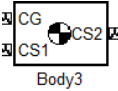
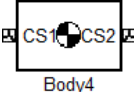
 Body2	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[13 0 (11-13/2)]	m
	CS1	[12 0 11]	m
	CS2	[12 0 11-13]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	External graphics file	
Подключение	CG		
 Body3	Body3		
	Массовые характеристики		
	Масса	m4	kg
	Инерция	I4	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[12 0 (11-13-14/2)]	m
	CS1	[12 0 11-13]	m
	CS2	[12 0 11-13-14]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	External graphics file		
Подключение	CG		
 Body4	Body4		
	Массовые характеристики		
	Масса	m5	kg
	Инерция	I5	kg*m^2
	Положение		
	Точка	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[12 0 (11-13-14-15/2)]	m
	CS1	[12 0 11-13-14]	m
	CS2	[12 0 11-13-14-15]	m
	Визуализация		
Геометрия тела	External graphics file		
Подключение	CG		

Табл. Б3.4. Настройки блоков Joints

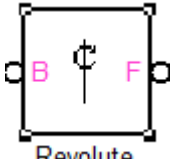
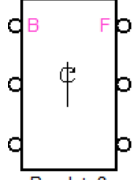
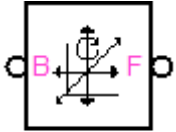

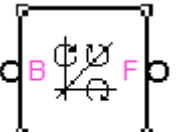
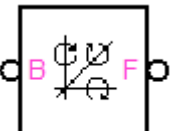
 Revolute	Revolute		
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS World
 Revolute2	Revolute2		
	Ось движения	[0 0 1]	Referens CS World

Табл. Б3.3. Настройки блоков Body (Продолжение)

 Custom Joint	Custom Joint			
	Ось движения	$[0 \ 1 \ 0]$	Referens CS	World
 Weld	Weld			
	Ось движения	$[0 \ 0 \ 0]$	Referens CS	World
 Gimbal	Gimbal			
	Ось движения	$[1 \ 0 \ 0]$ $[0 \ 1 \ 0]$ $[0 \ 0 \ 1]$	Referens CS	World
 Gimbal1	Gimbal1			
	Ось движения	$[1 \ 0 \ 0]$ $[0 \ 1 \ 0]$ $[0 \ 0 \ 1]$	Referens CS	World

## Приложение В1

### Текст управляющего файла для задачи «трёхмассовая система»

```

clc
% Массы элементов
m1=1;m2=1;m3=1;x0=0;x01=0.5;x02=2*x01;x03=3*x01;
% Коэффициенты жёсткости пружин
c01=20;c12=20;c23=20;
% Коэффициенты демпфирования
b01=0;b12=0;b23=0;
% задаваемая частота
w=1.990287715;
% параметры моделирования внешнего воздействия
r=0.1;m=0.1;e=pi/2;
w2rm=w^2*r*m;
% тензоры жёсткости и демпфирования
C=[c01+c12 -c12 0;-c12 c12+c23 -c23;0 -c23 c23];
B=[b01+b12 -b12 0;-b12 b12+b23 -b23;0 -b23 b23];
M=[m1 0 0;0 m2 0;0 0 m3];
CMw=C-w^2*M;
dCM=det(CMw);
% строка указания рабочей модели
sim('SimMechPlat3')
% Получение данных
t=tout;
position_body1=yout(:,1);
position_body2=yout(:,2);
position_body3=yout(:,3);
figure;
% Построение графиков
subplot(1,1,1);
plot(t,position_body1,'-
.k',t,position_body2,'k',t,position_body3,':k','linewidth',2),
% grid on;
%set(gca,'fontsize',10);
title('Фазовый портрет');
xlabel('Время, с');
ylabel('Положение тел, мм,');
legend('position-body1',0,'position-body2',0,'position-
body3',0)

```

### Таблица настройки основных блоков для задачи «трёхмассовая система»

Табл. В1.1. Настройки блока Machine Environment

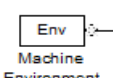
	<b>Machine Environment</b>		
	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>

Табл. В1.2. Настройки блоков Ground

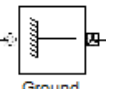
	<b>Ground</b>		
	Положение	[0 0 0]	m
	Show Machine Environment port		

Табл. В1.3. Настройки блоков Body

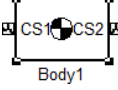
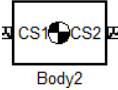
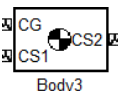
 Body1	Body1			
	Массовые характеристики			
	Масса	m1	kg	
	Инерция	eye(3)	kg*m^2	
	Положение			
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]		
	CG	[x01 0 0]	m	
	CS1	[0 0 0]	m	
	CS2	[0 0 0]	m	
	Визуализация			
Геометрия тела	External graphics file			
Подключение	CS1-CS2			
 Body2	body 2			
	Массовые характеристики			
	Масса	m2	kg	
	Инерция	eye(3)	kg*m^2	
	Положение			
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]		
	CG	[x02 0 0]	m	
	CS1	[0 0 0]	m	
	CS2	[0 0 0]	m	
	Визуализация			
Геометрия тела	External graphics file			
Подключение	CG			
 Body3	Body3			
	Массовые характеристики			
	Масса	m3	kg	
	Инерция	eye(3)	kg*m^2	
	Положение			
	порт	Вектор положения точки тела [x y z]		
	CG	[x03 0 0]	m	
	CS1	[0 0 0]	m	
	CS2	[0 0 0]	m	
	Визуализация			
Геометрия тела	External graphics file			
Подключение	CG			

Табл. В1.4. Настройки блоков Joints

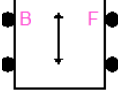
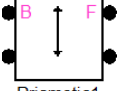
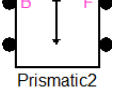
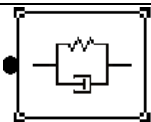
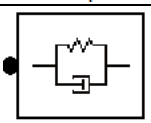
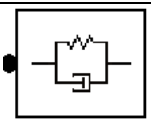
 Prismatic	Prismatic			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
 Prismatic1	Prismatic1			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World
 Prismatic2	Prismatic2			
	Ось движения	[1 0 0]	Referens CS	World

Табл. В1.5. Настройки блоков Joint Spring &amp; Damper

	Ось контакта	коэффициент жесткости пружины	Коэффициент демпфирования	Начальное положение	Размерность положения	Размерность скорости
 Joint Spring & Damper	Joint Spring & Damper					
	P1	c01	b01	x0	m	m/c
 Joint Spring & Damper1	Joint Spring & Damper1					
	P1	c12	b12	x0	m	m/c
 Joint Spring & Damper2	Joint Spring & Damper2					
	P1	c23	b23	x0	m	m/c

## Приложение Г1

```

m1=0.2;
m2=0.13;
m3=0.16;
L1=0.019;
L2=0.1;
L3=0.115;
Ls2=0.04;
Ls3=0.045;
y02=-0.02;
x02=0.08;
I1=(m1*L1^2)/2;
I2=0.1*m2*(L2^2);
I3=0.1*m3*(L3^2);

A1=2*y02*L3;
B1=2*L3*(x02-L1);
C1=x02*x02+L1*L1+L3*L3+y02*y02-L2*L2-2*x02*L1;
f3=2*atan((-A1-sqrt(A1*A1+B1*B1-C1*C1))/(C1-B1));
A2=-2*y02*L2;
B2=-2*L2*(x02-L1);
C2=x02*x02+L1*L1+L2*L2+y02*y02-L3*L3-2*x02*L1;
f2=2*atan((-A2+sqrt(A2*A2+B2*B2-C2*C2))/(C2-B2));

V=10; a=0;

Mp=6; Mc=20; Mx=2; Msp=2; w=1000;
K=(Mp-Msp)/w;

```

Таблица настройки основных блоков для задачи «кривошипно-коромыслового механизма»

Табл. Г1.1. Настройки блока Machine Environment

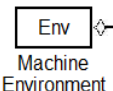
	Machine Environment		
	Вектор гравитации	[0 -9.81 0]	m/s <sup>2</sup>

Табл. В1.2. Настройки блоков Ground

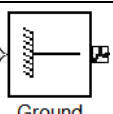
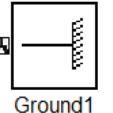

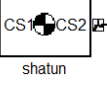
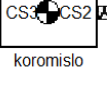
	Ground		
	Положение	[0 0 0]	m
Show Machine Environment port			
	Ground		
	Положение	[x02 y02 0]	m



Табл. Г1.3. Настройки блоков Body

 krivoship	krivoship		
	Массовые характеристики		
	Масса	m1	kg
	Инерция	[0 0 0; 0 0 0; 0 0 I1]	kg*m^2
	Положение		
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[0 0 0]	m
	CS1	[0 0 0]	m
	CS2	[L1 0 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CS1-CS2		
 shatun	shatun		
	Массовые характеристики		
	Масса	m2	kg
	Инерция	[0 0 0; 0 0 0; 0 0 I2]	kg*m^2
	Положение		
	Порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[L1+Ls2*cos(f2) Ls2*sin(f2) 0]	m
	CS1	[L1 0 0]	m
	CS2	[L1+L2*cos(f2) L2*sin(f2) 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CG		
 koromislo	koromislo		
	Массовые характеристики		
	Масса	m3	kg
	Инерция	[0 0 0; 0 0 0; 0 0 I3]	kg*m^2
	Положение		
	порт	Вектор положения точки тела [x y z]	
	CG	[x02+Ls3*cos(f3) y02+Ls3*sin(f3) 0]	m
	CS2	[x02 y02 0]	m
	CS3	[L1+L2*cos(f2) L2*sin(f2) 0]	m
	Визуализация		
	Геометрия тела	Use machine default body geometry	
Подключение	CG		

## Литература

1. Kopytenko Yu., Sergushin P., Petrishchev M., Levanenko V., Perechesova A. The device for manufacturing torsion bars with helical anisotropy UISAT-1 // Key Engineering Materials Vol. 437 (2010). – Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. P. 625–628.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. – М.: Наука. 1988. – 640 с.
3. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учебник для вузов / И. И. Артоболевский . – 6-е изд., стер., перепеч. с изд. 1988 г. – М.: Альянс, 2011 . – 640 с. - ISBN 978-5-91872-001-1.
4. Беленький И.М. Введение в аналитическую механику – СПб.: Высшая школа, 1964. – 328 с.
5. Брицкий В. Д., Тимофеев Б. П. Синтез и анализ механизма с высшей кинематической парой; М-во образования РФ ; СПбГУ ИТМО, Каф. МТ. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004 .— 16 с.: ил.
6. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. М.: Наука, 1971, 264 с.
7. Вейц В.Л. Динамика управляемых машинных агрегатов – М.: Наука. 1984. – 352 с.
8. Диевский В.А. Теоретическая механика. – СПб.: изд. Лань, 2005. – 320 с.
9. Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М. и др. Курс теоретической механики. / Под ред. К.С. Колесникова. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005.
10. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК – Пресс, 2008. – 784 с.: ил
11. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 и MATLAB 7 + Simulink 6 в математике и математическом моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
12. Заморуев Г.Б., Калапышина И.И. Кинематическое управление двухпараметрической сканирующей антенной // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 78. Механика и мехатроника./ Главный редактор д.т.н, проф. В.О. Никифоров, 2012. С. 78–83.
13. Калапышина И.И. Моделирование динамики станка для обработки стёкол // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 74-77.
14. Кинематические схемы роботов, их описание и анализ [Электронный ресурс]: официальный сайт МГТУ им. Баумана кафедра РК-2, Учебно-методический комплекс по теории машин и механизмов 2005 — Режим доступа: [http://tmm-umk.bmstu.ru/lectures/lect\\_20.htm](http://tmm-umk.bmstu.ru/lectures/lect_20.htm), свободный.

15. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.: ил.
16. Механизмы П.Л. Чебышева [Электронный ресурс]: официальный сайт Фонд «Математические этюды» 2009-2013 — Режим доступа: <http://www.tcheb.ru/> свободный.
17. Нуждин К.А. Разработка трибометрической системы с обратной связью // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского. - 2011. - Т. 2. - 3. - С. 1209.
18. Перечесова А.Д. Анализ и синтез механизма для плетения торсионных подвесов приборов: дис. канд. техн. наук: 05.02.18. СПб, 2012. – 125 с.
19. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов – М.: Издательский центр "Академия", 2007г.
20. Соколовский Г.Г., Постников Ю.В., Егоров В.А. Математическая модель бесконтактного моментного электропривода. Известия ЛЭТИ; вып. 416 Микропроцессорные системы управления сложными электромеханическими объектами и комплексами, сб. научн. трудов; 1989г.
21. Справочная система MATLAB.

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

