

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 19.01.2022 18:25:44
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

16.01 2017 г.

ТЕОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИЯХ СИСТЕМ

методические указания по выполнению заданий
на практических занятиях и самостоятельной работы
для студентов направления
15.04.06 Мехатроника и робототехника

Курск 2017

УДК 681.323

Составитель: Лушников Б.В.

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент Юго-Западного государственного университета *Е.Н.Политов*

Теория эксперимента в исследованиях систем: методические указания по выполнению заданий на практических занятиях и самостоятельной работы для студентов направления 15.04.06 Мехатроника и робототехника / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Б.В. Лушников. - Курск, 2017. 28 с.

Изложены теоретические предпосылки, задания и примеры выполнения заданий на практических занятиях и для самостоятельной работы по дисциплине «Теория эксперимента в исследованиях систем».

Методические указания предназначены для студентов направления 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. Уч.-изд.л. Тираж 30 экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА: ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ. В СРЕДЕ SIMMECHANICS/SIMULINK/MATLAB

Цель практического занятия: Ознакомиться с возможностями пакета *SimMechanics* для проведения численного эксперимента в виде компьютерного моделирования процесса уравнивания обращенного маятника в вертикальном положении за счет управляемого движения ползуна. Освоить основные принципы создания имитационных математических моделей подобных мехатронных систем.

1.1 ЗАДАНИЕ НА ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

На рис.1.1 представлена расчетная схема исследуемого объекта – горизонтальный подвижный корпус (ползун) с прикрепленным к нему обращенным маятником. Задача численного экспериментального исследования заключается в стабилизации вертикального положения обращенного маятника, установленного на ползуне.

Построим блок-схему модели мехатронного устройства, задачей которого будет за счёт перемещения ползуна удерживать маятник в вертикальном положении.

Исходные данные:

масса маятника $m = 0.2$ кг;

длина маятника $l = 0.02$ м

начальный угол отклонения маятника от положения равновесия $\varphi_0 = 175^\circ$.

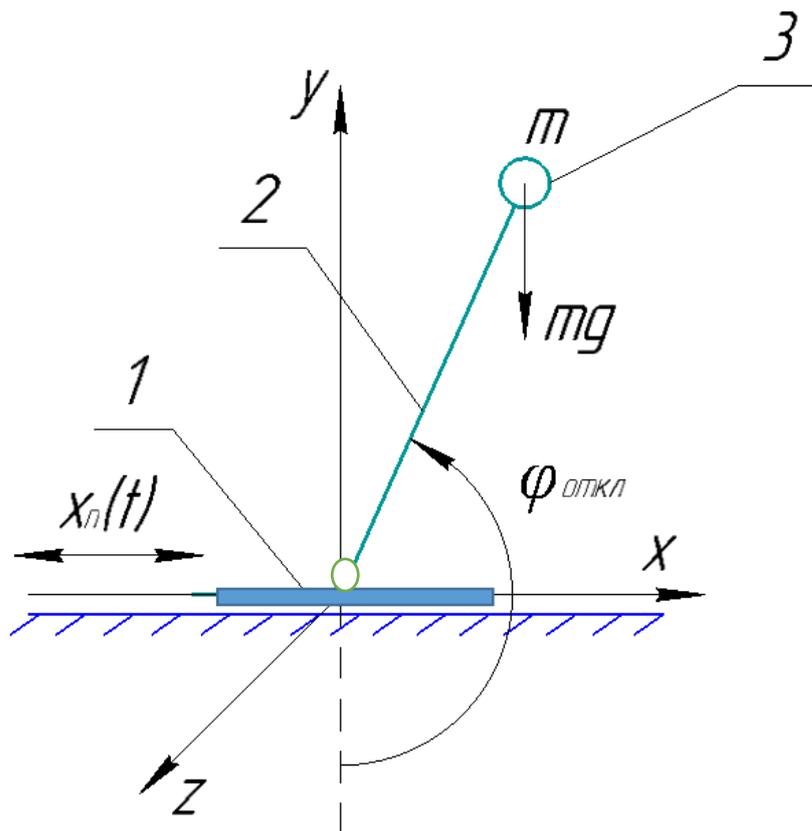


Рис.1.1 Расчётная схема механической части исследуемого мехатронного устройства: 1- ползун, 2-невесомый стержень, 3-груз

Имеется невесомый стержень (2) с грузом (3), который крепится и вращается вокруг горизонтальной оси, проходящей через середину верхней грани ползуна (1), который может совершать поступательное движение вдоль оси X. Известны начальный угол положения маятника, масса груза маятника и длина маятника.

1.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Создайте новую Simulink-модель.
2. Для задания стойки используем блок «Ground», который находится в разделе Bodies пакета SimMechanics. В параметрах блока указываются координаты $[0\ 0\ 0]$, которые будут соответствовать координатам начала отчета.
3. Далее присоединяем к блоку «Ground» блок «Joint Initial Condition». В параметрах блока укажите позицию Position = 0 м (рис. 2.2).

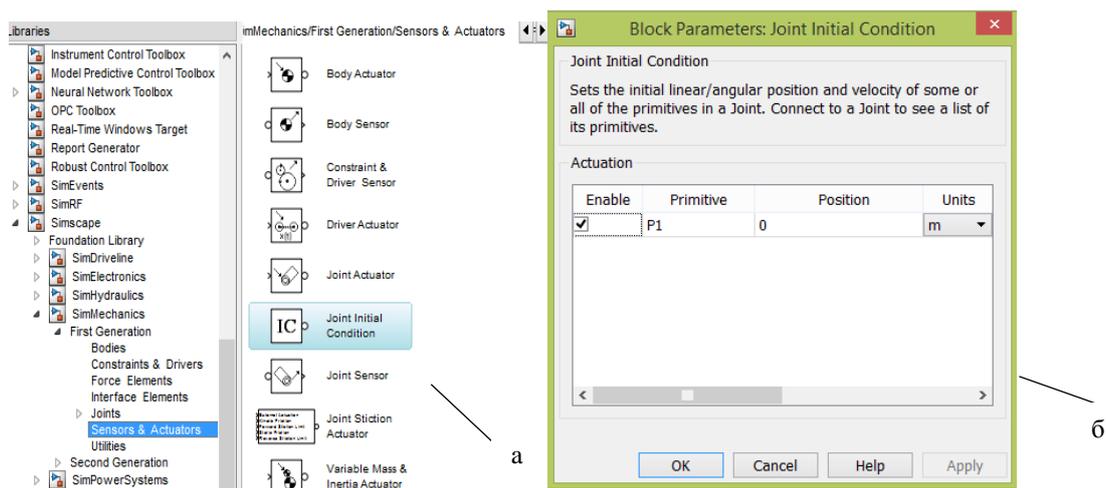


Рис.2.2 Блок «Joint Initial Condition»: а)-расположение в библиотеке, б)-параметры настройки

4. Так как корпус может совершать только поступательное движение по оси x , то возьмем в качестве блока сопряжения блок «Prismatic». В параметрах блока необходимо указать $[1\ 0\ 0]$, что будет означать возможность движения по оси x .

5. К одному из входов данного блока подключайте блок «Joint Sensor», который позволяет измерить характеристики относительного движения частей примитива. В данном случае выбираем примитив-«поступательный P» и выбираем следующие параметры измерения (рис.2.4):

- позицию (Position) – перемещение части примитива, соединенной с телом Follower, относительно его части, соединенной с телом Base;
- скорость (Velocity) – относительная скорость;
- ускорение (Acceleration) – относительное ускорение;
- реакция (Reaction force) – сила реакции вдоль оси примитива.

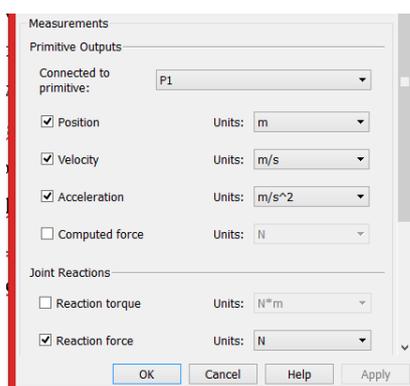


Рис.1.3 Настройки блока «Joint Sensor»

6. Моделирование корпуса (ползуна) данного механизма реализуется при помощи блока «Body» (рис.1.4), который представляет собой твердое тело (отдельное звено механизма, движения которого моделируются) с определенными пользователем параметрами. Данный блок находится в разделе Bodies пакета SimMechanics.

В качестве задаваемых параметров выступают:

- масса тела (Mass), которая может быть выражена в различных единицах;
- тензор инерции тела относительно его центра масс (Inertia), представляющий собой матрицу размером 3x3:

$$H = \begin{bmatrix} J_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & J_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{iz} \end{bmatrix},$$

где J_{ix} , J_{iy} , J_{iz} , – осевые моменты инерции тела относительно осей собственной локальной системы координат, связанной с его центром масс.

Для того, чтобы добавить или убрать изображение входа/выхода определенной точки на пиктограмме блока «Body» в окне модели, используется установка или сброс флажка в колонке Show port.

В колонке Translated from origin of указывается имя системы координат, от начала которой отсчитываются координаты текущей характерной точки. Как минимум одна характерная точка должна быть задана в системе координат WORLD либо в системе координат ADJOINING. Это необходимо, чтобы связать данное тело с соседними неподвижными или подвижными телами. Система координат WORLD – это инерциальная неподвижная система, связанная с Землей, а система координат ADJOINING связана с шарниром.

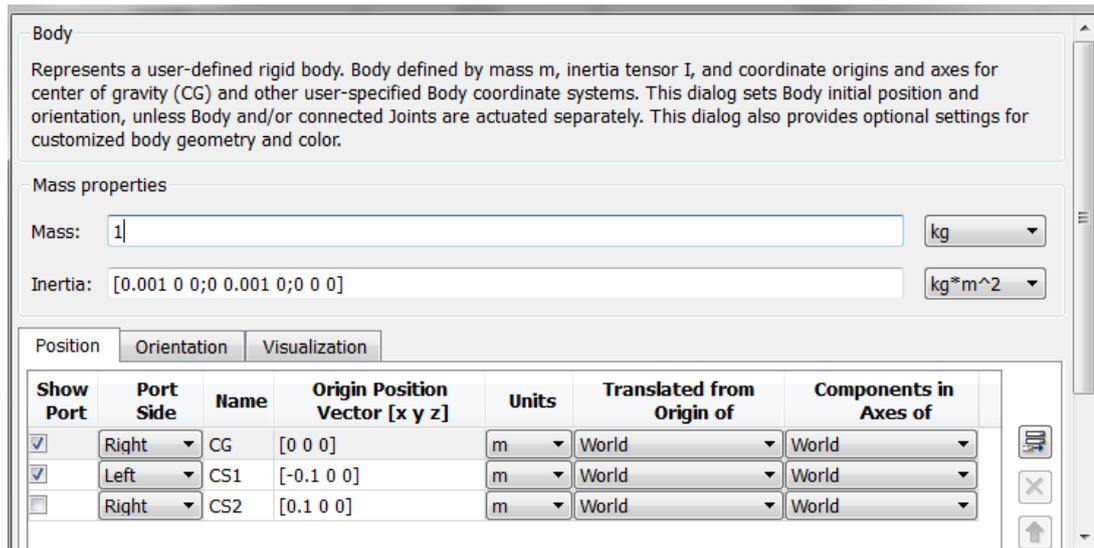


Рис. 1.4 Настройка параметров блока «Body»

7. Так как стержень может совершать только вращение вокруг оси OZ, то возьмем в качестве блока сопряжения блок «Revolute» (рис. 1.5). В параметрах блока необходимо указать $[0\ 0\ 1]$, что будет означать возможность вращения вокруг оси OZ.

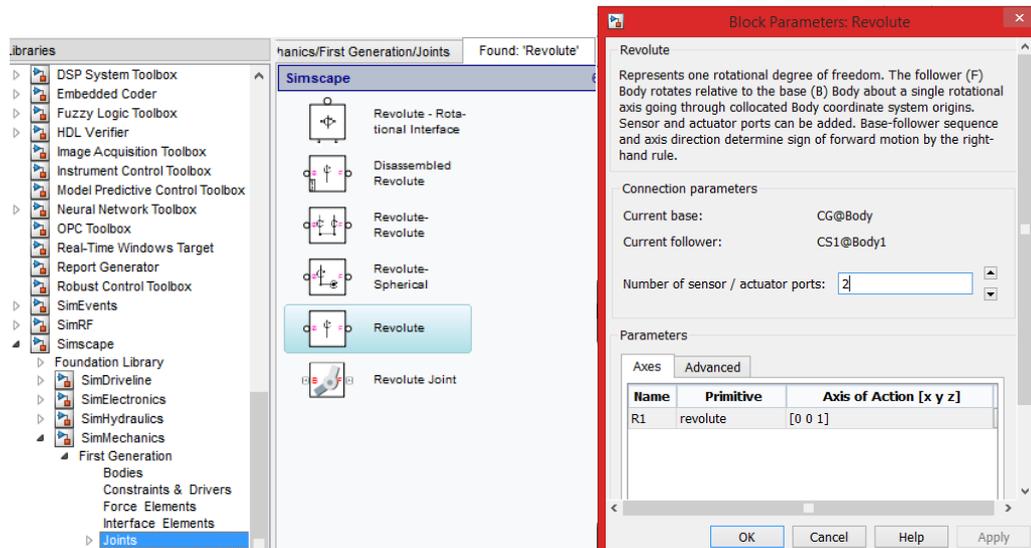


Рис.1.5 Блок Joint Revolute: а)-расположение в библиотеке,

б)-параметры настройки

8. На вход блока «Revolute» подключается блок «Joint Initial Condition», где указываем начальный угол $\varphi = 175^\circ$.

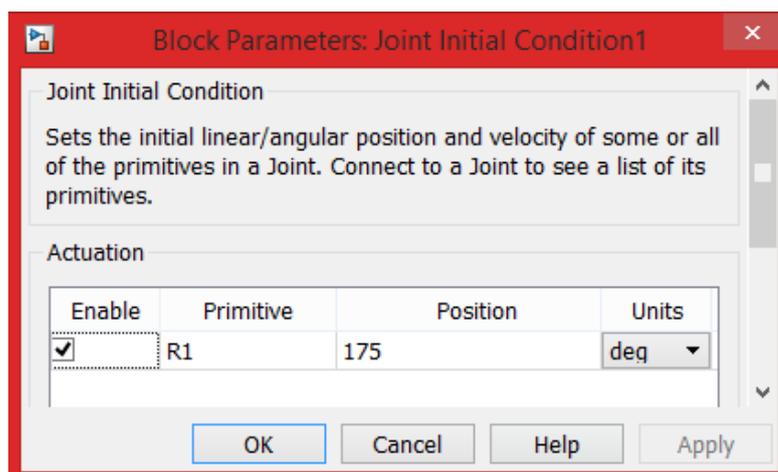


Рис. 1.6 Настройки блока «Joint Initial Condition»

9. К блоку «Revolute» подключается блок «Body1», который моделирует стержень с грузом. Поскольку сила инерции задается относительно центра масс тела, в блоке Body1 делается соответствующая рис.1.7 запись тензора инерции.

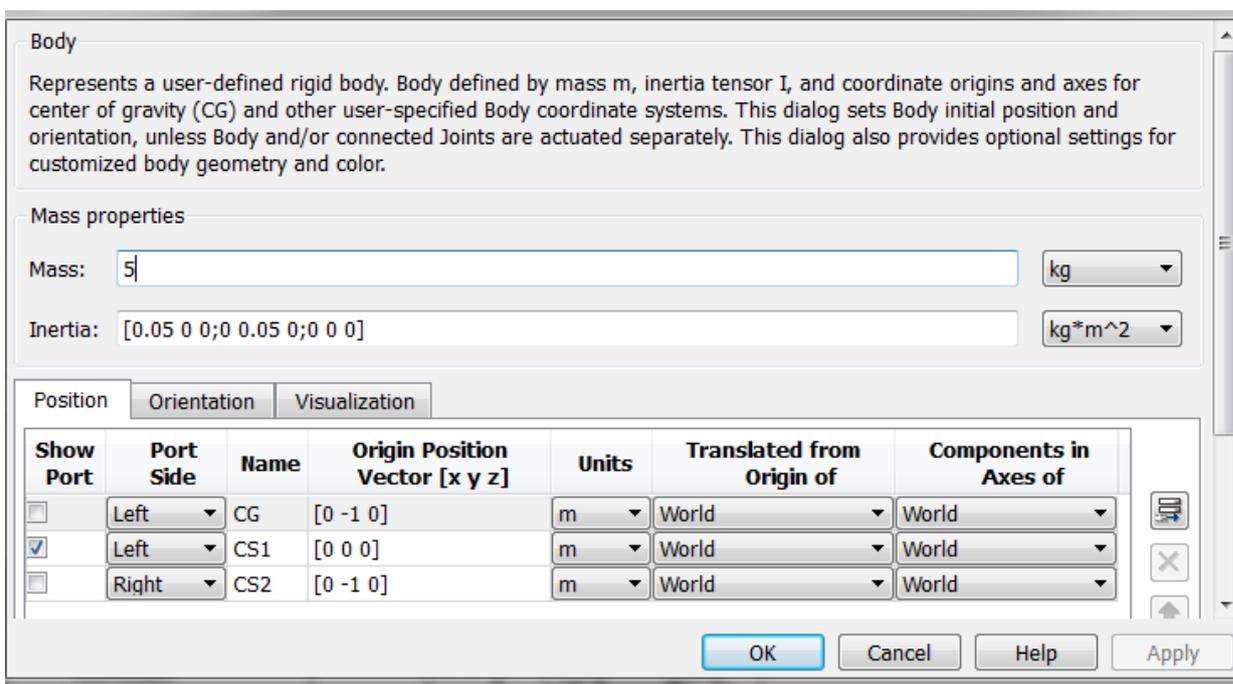


Рис. 1.7 Настройка параметров блока «Body1»

10. К выходу блока «Revolute» подключается блок «Joint Sensor1» (рис.1.8).

Параметры для измерения, следующие:

- угол (Angle) – угол поворота части примитива, соединенной с телом Follower, относительно его части, соединенной с телом Base;
- относительную угловую скорость (Angular velocity);
- относительное угловое ускорение (Angular acceleration);

Помимо этого, вставляем галочку на флажок «Output selected parameters as one signal» для того, чтобы можно было измерить все 3 параметра в одном сигнале.

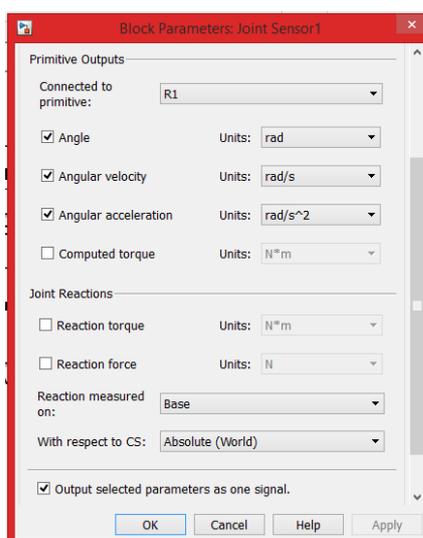


Рис. 1.8 Настройки блока «Joint Sensor1»

11. Через элемент «Demux» разбиваем измеренные параметры на 3 части. Кроме блоков «Score» еще присутствует блок «Continuous Angle» (рис. 1.9, в), который позволяет получить правильное значение относительного угла поворота.

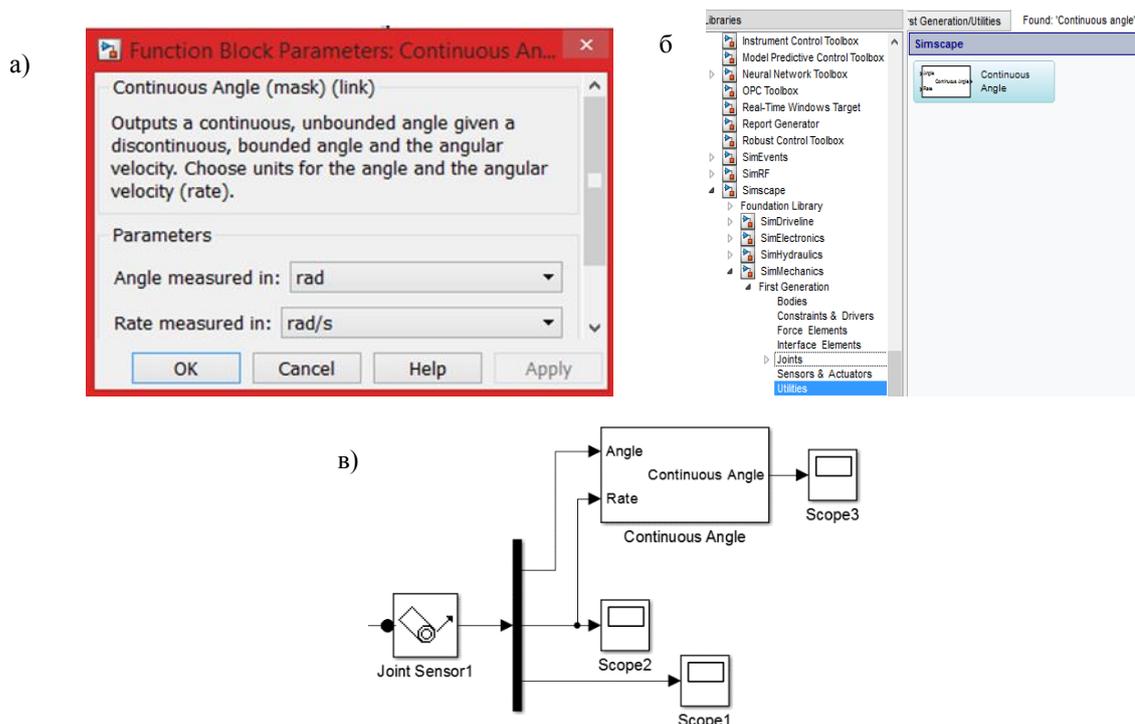


Рис. 1.9 Измерение параметров: а)-расположение в библиотеке, б)-настройки Continuous Angle, в)-схема подключения

12. Значение измеренного угла сравниваем с значением $\varphi=180^\circ$, ошибка подается в PID-регулятор (рис.1.10), откуда сигнал поступает в качестве ускорения, скорости и перемещения ползуна, за счет движения которого и удерживается обращенный маятник в вертикальном состоянии.

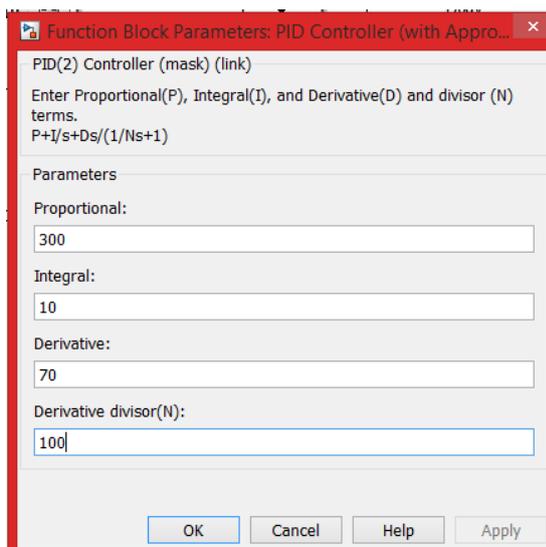


Рис.1.10 Настройка блока PID-регулятор

13. Чтобы задать движение, два раза интегрируется сигнал с PID-регулятора. Далее сигналы объединяются в один с помощью блока Mux и

подаются на «Joint Actuator». Сигнал от «Joint Actuator» подается на «Prismatic» (рис.1.11).

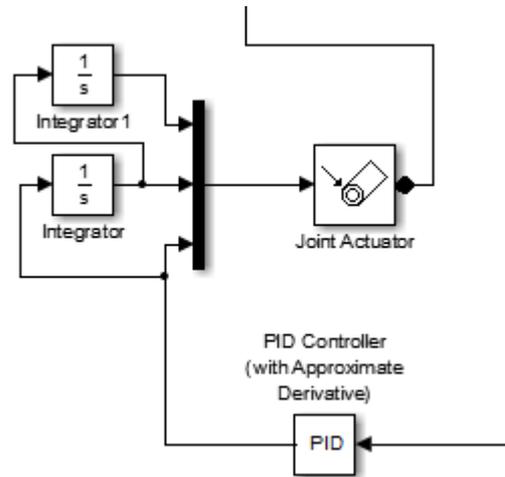


Рис. 1.11 Блок-схема задания движения ползуна

Коэффициенты настройки ПИД-регулятора представлены на рис.1.12.

Controller parameters	
Source:	internal
Proportional (P):	300
Integral (I):	50
Derivative (D):	100

Рис. 1.12 Коэффициенты ПИД-регулятора

Добавим в модель вязкое трение (рис. 1.13). К сигналу Reaction force на оси у присоединяется блок Gain. Далее присоединяется блок «Joint Actuator1», выход которого присоединяется ко входу блока «Prismatic».

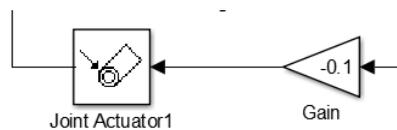


Рис.1.13 Моделирование вязкого трения

Имитационная модель рассматриваемого объекта в среде SimMechanics представлена на рис 1.14.

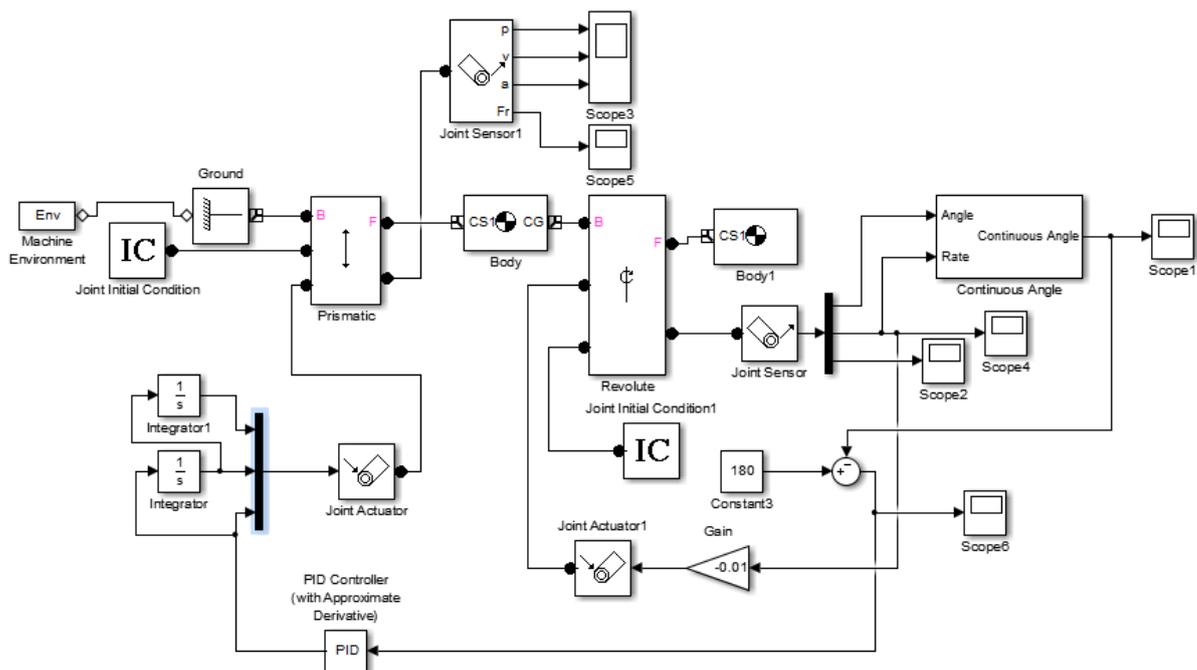


Рис. 1.14 Схема модели ползуна с обращенным маятником

Полученные результаты:

Результаты в виде графиков перемещения, скорости и ускорения ползуна (рис.1.15) в процессе приведения обращенного маятника в вертикальное положение показаны в блоке «Scope».

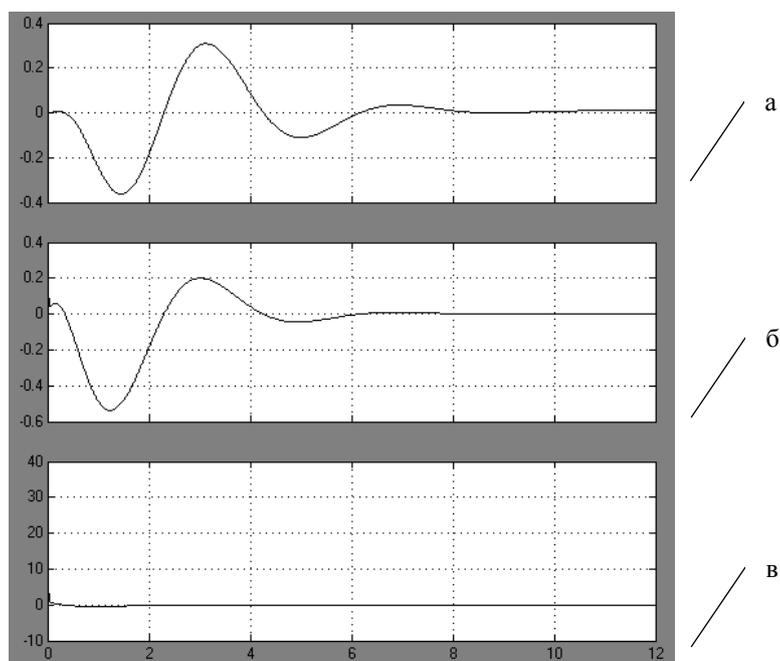


Рис. 1.15 Графики: а) -перемещения, б) -скорости, в) -ускорения ползуна

График сил реакции, возникающих при движении ползуна (рис.1.16) показан в блоке «Scope 5».

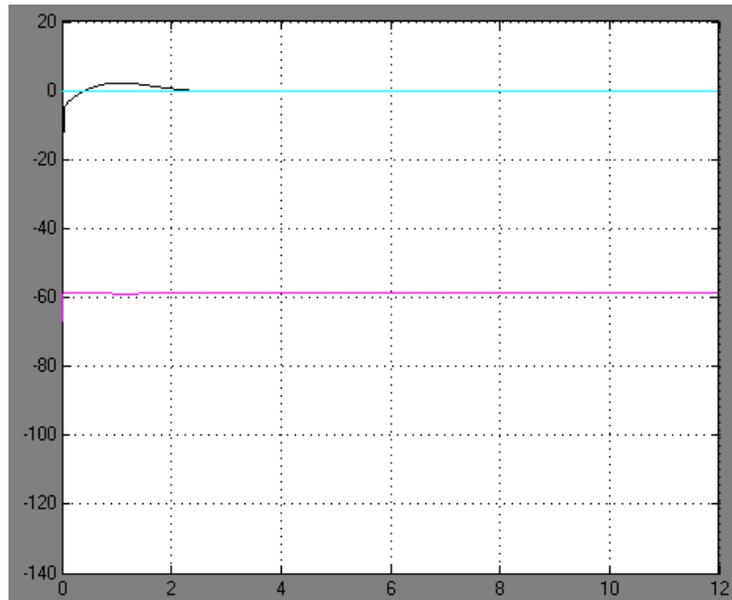


Рис. 1.16 График сил реакции, возникающих при движении ползуна

График угла поворота маятника (рис.1.17) показан в блоке «Score1».

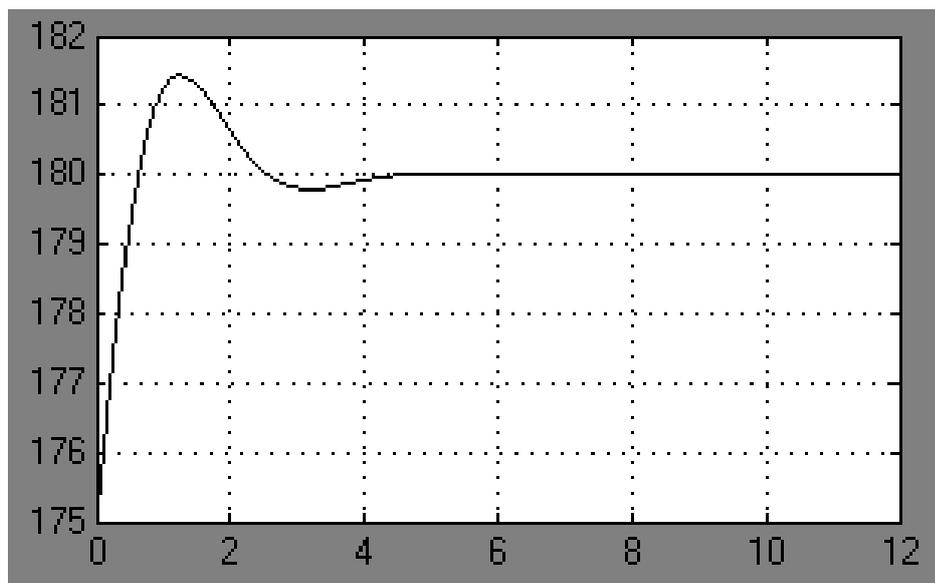


Рис. 1.17 График угла поворота обращенного маятника

График углового ускорения маятника (рис.1.18) показан в блоке «Score2».

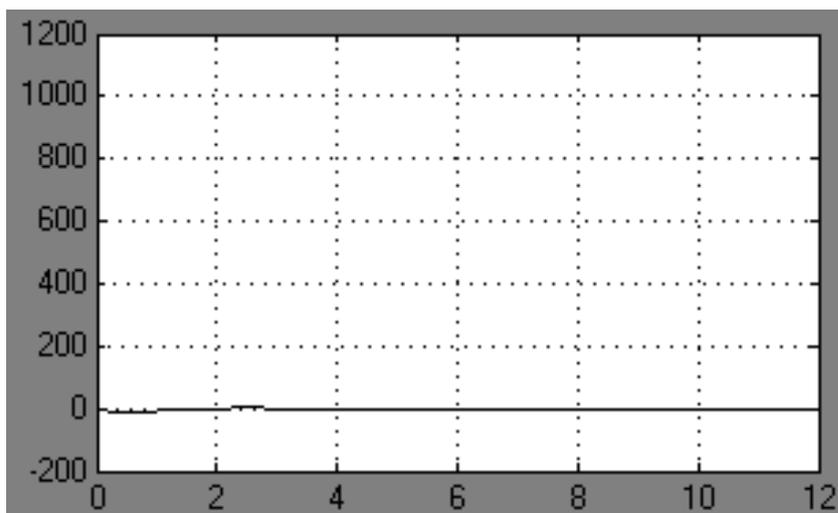


Рис. 1.18 График углового ускорения маятника

График «ошибки» угла поворота маятника (рис.1.19) показан в блоке Score 6.

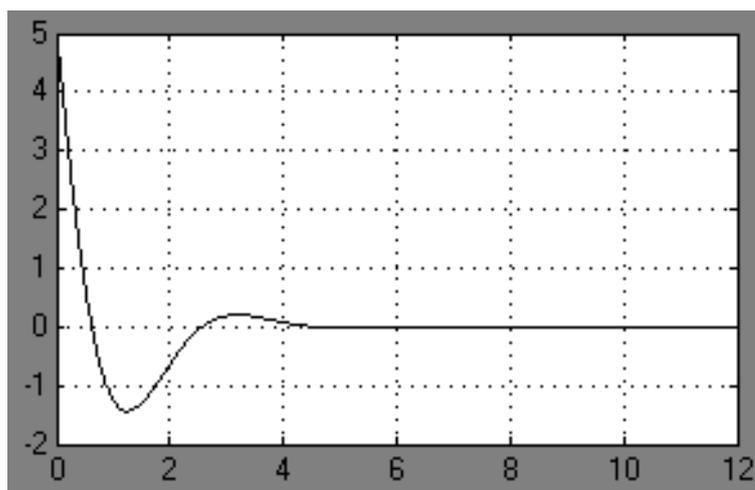


Рис. 1.19 График «ошибки» угла поворота маятника

Вывод: При выполнении данной работы было проведено компьютерное моделирование процесса приведения обращенного маятника в вертикальное положение за счет управляемого движения ползуна с в среде MATLAB/Simulink/SimMechanics. Были получены графики перемещения скорости и ускорения ползуна и маятника, а также графики сил реакции, возникающих при движении ползуна. Также был получен график ошибки угла поворота маятника. Представленные результаты показывают, что при

соответствующей настройке ПИД-регулятора представляется возможным привести маятник в вертикальное положение примерно за 4 секунды.

1.3 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

Таблица 1.1 – Варианты задания

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса обращенного маятника, кг	0.6	0.7	0.3	0.55	0.46	0.25	0.48	0.37	0.35	0.8
Длина маятника, l , м	0,52	0,61	0,33	0.53	0,7	0,65	0,7	0.8	0,4	0,38
Начальный угол положения маятника, φ_0	170	165	140	135	175	161	130	150	155	172

2.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. За счёт чего удастся привести обращенный маятник в вертикальное положение?
2. Как формируется необходимое перемещение ползуна для приведения обращенного маятника в вертикальное положение?
3. Какой максимальный начальный угол может иметь обращенный маятник, из которого его можно было бы привести к вертикальному положению?
4. Как можно уменьшить время процесса приведения маятника к вертикальному положению?
5. Какую роль играет вязкое сопротивление в оси обращенного маятника?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании / Дьяконов В.П. Полное руководство пользователя - М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576 с.
2. M54 Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB: Учебное пособие / В.С.Щербаков, М. С. Кобытов, А.А. Руппель и др.– Омск: СибАДИ, 2007. – 84с.
3. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений / Мусалимов В.М., Г.Б. Замоуев, И.И. Калапышина, и др. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 114 с.
4. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / Лазарев Ю.П. - СПб.: Питер, 2005, 511 с.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕОРИИ РАЗМЕРНОСТЕЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ИЗ
УРАВНЕНИЙ ПРОЦЕССА

3. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель практического занятия: ознакомление с методикой математического моделирования при оптимальном планировании эксперимента.

Аппаратные средства: виртуальная лаборатория на ЭВМ IBM PC, программные пакеты «MathCAD», «MATLAB/Simulink».

3.1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Математическое моделирование сложных динамических систем может быть успешно использовано при параметрической оптимизации различных технологических процессов, электронных систем управления, механических объектов. Эти задачи решаются методами оптимального планирования эксперимента.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Для решения технологических и конструкторских задач планирование эксперимента играет важную роль. Оно позволяет:

- минимизировать общее число опытов;
- одновременно варьировать всеми переменными, определяющими процесс;
- использовать математический аппарат, формализующий многие действия экспериментатора.

Процесс решения задач, при котором ищутся наилучшие условия реализации процесса, называется оптимизацией.

При решении задач оптимизации выбирается критерий оптимизации и его зависимость от ряда факторов. Такая зависимость называется математической моделью объекта исследования:

$$K = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где K – критерий оптимизации;

x_i – варьируемые факторы;

n – количество факторов.

Фактором называется измеряемая переменная величина, принимающая в некоторый момент времени определённое значение.

Каждый фактор имеет свою область определения. Требования, предъявляемые к факторам: управляемость, точность, однозначность.

Факторы разделяются на количественные и качественные. Качественные факторы – это разные вещества, разные технологические способы, аппараты, исполнители и т.д. Количественные факторы – это время реакции, температура, концентрация, величина рН и т.д.

Фактор может принимать одно или несколько значений, которые называются **уровнями**.

Для проведения экспериментов задаются фиксированным числом уровней. При этом число различных состояний или число опытов определяется как p^n , где p – число уровней, n – число факторов.

Интервалом варьирования факторов называется некоторое число, прибавление которого к основному уровню даёт верхний, а вычитание – нижний уровень факторов. То есть интервал варьирования – это расстояние на координатной оси между основным и верхним (или нижним) уровнями. Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных масштабы по осям выбираются так, чтобы верхний уровень соответствовал +1, нижний -1, основной – нулю.

При планировании эксперимента важно определить параметр, который нужно оптимизировать. Параметр оптимизации должен быть количественным, то есть задаваться числом. Множество значений, которые может принимать параметр оптимизации, называется **областью его определения**.

Основные требования к параметру оптимизации: однозначность, универсальность, желательно, чтобы он имел физический смысл, был простым и легко вычисляемым.

После выбора параметра оптимизации и подбора факторов необходимо выбрать модель, то есть выбрать вид функции и записать её уравнение.

В основе решения задачи планирования лежит многомерное квадратичное планирование эксперимента с последующим решением задачи многомерной аппроксимации. Для этого используются стандартные планы второго порядка типа Бокса-Бенкена, Рехтшафнера и другие, а разработанные в МГУ им. Ломоносова для этих планов матрицы позволяют очень легко определять коэффициенты регрессионной модели. Получаемые аппроксимационные поверхности второго порядка являются выпуклыми и гладкими, что позволяет искать экстремум простыми градиентными методами. При этом используется дробный факторный эксперимент, при котором число опытов значительно меньше, чем при полном факторном эксперименте (где число опытов при двух уровнях $N=2^n$, n – число факторов).

Для нахождения глобального экстремума первоначально проводится планируемый эксперимент с охватом всего пространства. Проанализировав результаты численного эксперимента, можно выбрать узкую область, находящуюся в непосредственной близости от искомого экстремума. Затем выбирается новая область экстремума, при этом, если установлено, что тот или иной фактор мало влияет на критерий оптимизации, его целесообразно зафиксировать, что уменьшает пространство варьируемых параметров и упрощает решение задачи. Таким образом, перемещаясь в пространстве, удаётся найти решение поставленной задачи.

Зависимость критерия оптимизации K от вектора варьируемых параметров можно представить в виде линейной или нелинейной зависимости:

$$K = K_0 + K_1 \cdot \bar{q} + \bar{q} \cdot K_2 \cdot \bar{q}^T,$$

где K_0, K_1, K_2 – коэффициенты регрессионной модели,

\bar{q}^T – транспонированный вектор q .

Коэффициенты, вычисленные по результатам эксперимента, указывают на силу влияния фактора.

Нахождение экстремальных значений на этой поверхности осуществляется градиентным методом наискорейшего спуска, что позволит определить вектор \bar{q}_M , которому соответствует экстремум K_M .

Проведение эксперимента осуществляется в такой последовательности:

1. Описание изучаемого процесса.
2. Определение цели исследования.
3. Выбор параметров оптимизации.
4. Формулировка задачи оптимизации.
5. Определение факторов, влияющих на процесс (варьируемых факторов).
6. Выбор основного уровня и интервалов варьирования (табл.3.1).

Таблица 3.1 - Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни			Интервал варьирования	Размерность
	-1	0	+1		

7. Составление матрицы планирования (для четырёхфакторного трёхуровневого эксперимента см. табл.3.2) и получения результатов эксперимента.

Таблица 3.2 - Рабочая матрица планирования

№ эксперимента	Варьируемые параметры				Функция аппроксимации
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	-	-	-	-	Y_1
2	+	0	0	0	Y_2
3	0	+	0	0	Y_3
4	0	0	+	0	Y_4
5	0	0	0	+	Y_5
6	-	+	+	+	Y_6
7	+	-	+	+	Y_7
8	+	+	-	+	Y_8
9	+	+	+	-	Y_9
10	-	-	+	+	Y_{10}
11	-	+	-	+	Y_{11}
12	-	+	+	-	Y_{12}
13	+	+	-	-	Y_{13}
14	+	-	+	-	Y_{14}
15	+	-	-	+	Y_{15}

8. Обработка экспериментальных данных на ЦЭВМ, построение регрессионной модели, определение оптимальных параметров.

9. Выводы.

Примечание. Для решения задач оптимизации используется стандартный план Рехтшафнера, на основании которого была составлена программа расчёта в среде MathCAD.

3.2 ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ПРОЕЗДЕ ЕДИНИЧНОЙ НЕРОВНОСТИ

Задание: исследовать модель колебаний подвески автомобиля в продольной вертикальной плоскости; определить для данной модели оптимальные значения жёсткости упругих элементов и коэффициентов вязкого сопротивления передней подвески и её шин.

3.2.1 Расчётная схема и исходные данные:

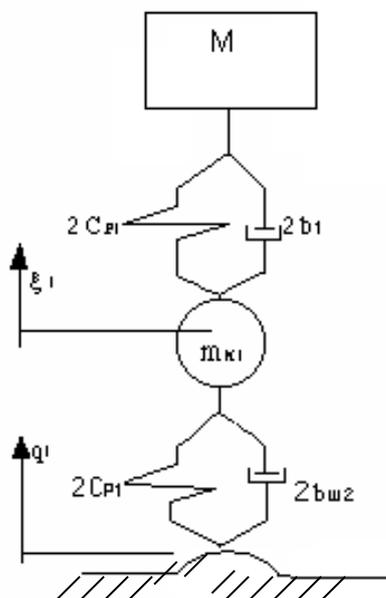


Рис.3.1 Расчётная схема колебаний передней подвески автомобиля

Исходные данные:

$M := 1268$ (кг) - масса подрессоренных частей автомобиля;

$m_{к1} := 130$ (кг) - масса неподрессоренных частей автомобиля, приходящаяся на переднюю ось;

$C_{p1} := 82000$ (Н/м) - жесткость упругих элементов передней подвески ;

$C_{ш1} := 200000$ (Н/м) - радиальная жесткость шин передних колёс;

$b_1 := 3000$ (Н*м/с) - коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов передней подвески;

$b_{ш1} := 1000$ (Н*м/с) - коэффициент сопротивления в шинах передней подвески;

$A_0 := 0.015$ (м) - наибольшая высота неровности;

$v := 5$ (км/ч) - скорость движения автомобиля;

$S := 0.2$ (м) - длина неровности;

$\nu := 2 \cdot \frac{\pi}{3.6} \cdot \frac{v}{S}$; $\nu = 43.633$ (с⁻¹) - частота воздействия неровностей дороги;

$t := 0, 0.006.. 3.0$ (с) - интервал и шаг изменения времени;

$x_0 := 2$ (м) - координата появления единичной неровности;

$l := 0.2$ (м) - длина неровности;

$a := 0.1$ (м) - высота единичной неровности;

$x(t) := \frac{v}{3.6} \cdot t - x_0$ - путевая координата;

$ss(x, l) := \Phi(x) - \Phi(x - l)$ - функция "окна";

$n1(t) := \frac{a}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{1 \cdot 3.6} \cdot t \right) \right)$ - уравнение периодической неровности;

$dn1(t) := a \cdot \pi \cdot \frac{v}{3.6 \cdot l} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{3.6 \cdot l} \cdot t \right)$ - производная от $n1(t)$;

$q3(t) := ss(x(t), l) \cdot n1(t)$ - функция единичной неровности, действующей на передние колёса;

$dq3(t) := ss(x(t), l) \cdot dn1(t)$ - производная функции $q3(t)$;

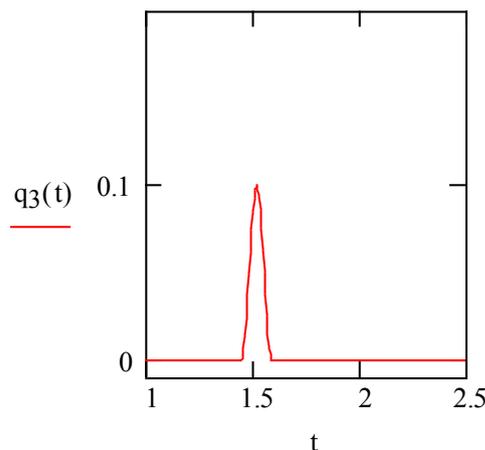


Рис3.2 Вид неровности дороги

3.2.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ

Вектор-столбец начальных условий зададим в следующем виде:

$$y := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{-начальное смещение центра масс кузова;} \\ \text{-начальная скорость центра масс кузова;} \\ \text{-начальное смещение передней оси;} \\ \text{-начальная скорость передней оси.} \end{array}$$

Составим вектор-функцию решения системы дифференциальных уравнений колебаний подвески автомобиля и построим график перемещения поддрессоренной части автомобиля:

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -1 \cdot \frac{[2 \cdot C_{p1} \cdot (y_0 - y_2) + 2b_1 \cdot (y_1 - y_3)]}{M} \\ y_3 \\ -1 \cdot \frac{[2 \cdot C_{p1} \cdot (y_2 - y_0) + 2 \cdot C_{ш1} \cdot (y_2 - q_3(t)) + 2 \cdot b_1 \cdot (y_3 - y_2) + 2 \cdot b_{ш1} \cdot (y_3 - q_3(t))]}{m_{к1}} \end{bmatrix} dq_3(t)$$

$Z := \text{rkfixed}(y, 0, 5, 2000, D)$ - оператор интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом;

$$i := 1 .. \text{last}(Z^{(0)}) \quad \text{- счётчик количества точек;} \\ \Delta_i := (Z^{(0)})_i \quad z_{1i} := (Z^{(1)})_i \quad \text{- время и перемещение кузова автомобиля.}$$

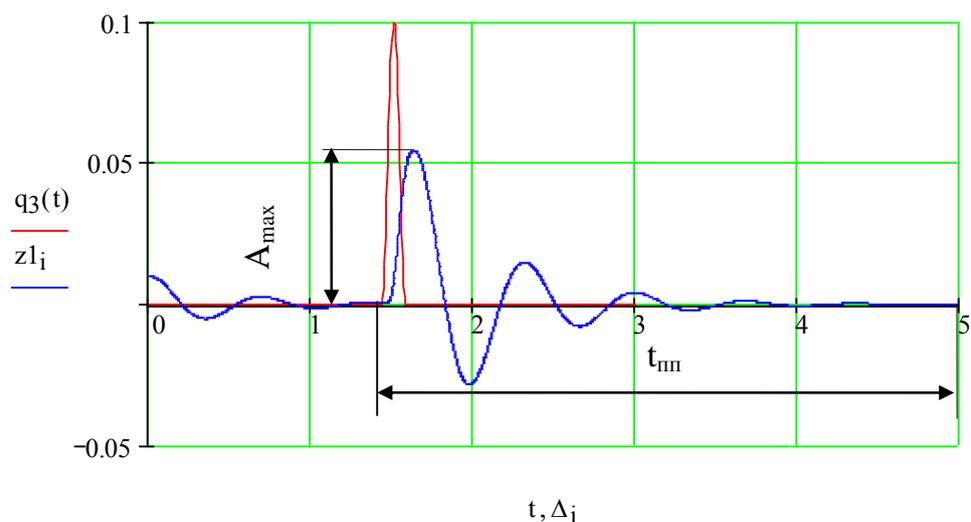


Рис.3.2.3 Перемещение поддрессоренной части автомобиля

Оптимальное значение жёсткости и коэффициентов вязкости определим, используя четырёхфакторный трёхуровневый план Рехтшафнера.

Матрица планирования эксперимента по плану Рехтшафнера для четырёх факторов и трёх уровней содержит 15 испытаний:

$$M_{\text{plan}} =$$

	1	2	3	4
1	-1	-1	-1	-1
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	-1	1	1	1
7	1	-1	1	1
8	1	1	-1	1
9	1	1	1	-1
10	-1	-1	1	1
11	-1	1	-1	1
12	-1	1	1	-1
13	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	-1
15	1	-1	-1	1

В качестве критерия оптимизации примем комплексный критерий, учитывающий время затухания свободных колебаний кузова при проезде единичной неровности $t_{\text{пп}}$ и его максимальное отклонение A_{max} (рис. 3.2.3):

$$K = k_1 \cdot t_{\text{пп}} + k_2 \cdot A_{\text{max}}.$$

Коэффициенты k_1 и k_2 обеспечивают равный вклад параметров $t_{\text{пп}}$ и A_{max} в значение комплексного критерия оптимизации K .

Целью оптимизации является минимизация критерия K , что позволит обеспечить как минимальное время переходного процесса, так и минимальное отклонение автомобиля при проезде единичной неровности.

Критерий оптимизации K , аппроксимированный поверхностью отклика в 5-мерном пространстве факторов x_1, x_2, x_3, x_4 , имеет вид:

$$y(x) = A_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + B_4 \cdot x_4 + C_{11} \cdot (x_1)^2 + C_{22} \cdot (x_2)^2 + C_{33} \cdot (x_3)^2 + C_{44} \cdot (x_4)^2 \dots \\ + C_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + C_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + C_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + C_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + C_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + C_{34} \cdot x_3 \cdot x_4$$

Функция поиска координат минимума критерия оптимизации $K = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в 5-мерном пространстве методом половинного деления имеет вид:

```

min_opt(y, x, D) :=
  Ymin ← y(x)
  while D > TOL
    p ← 1
    while p
      p ← 0
      for i ∈ 1..length(x)
        for X ∈ -D, D
          break if |xi| > 1
          xi ← xi + X
          Y ← y(x)
          if Y < Ymin
            p ← X
            j ← i
            Ymin ← Y
          break if |xi| > 1
          xi ← xi - X
        break if |xj| > 1
      xj ← xj + p
    D ← D/2
  x

```

3.2.3 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результатом поиска параметров, обеспечивающих минимум функции аппроксимации, является вектор-столбец

$$X_{\text{opt}} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

При переходе к размерным значениям, получим оптимальные параметры подвески автомобиля:

$$C_{p1} := 10000 \text{ (Н/м)};$$

$$C_{ш1} := 350000 \text{ (Н/м)};$$

$$b_1 := 1000 \text{ (Н*м/с)};$$

$$b_{ш1} := 1900 \text{ (Н*м/с)}.$$

График переходного процесса колебаний автомобиля при оптимальных значениях параметров подвески представлен на рис. 3.4.

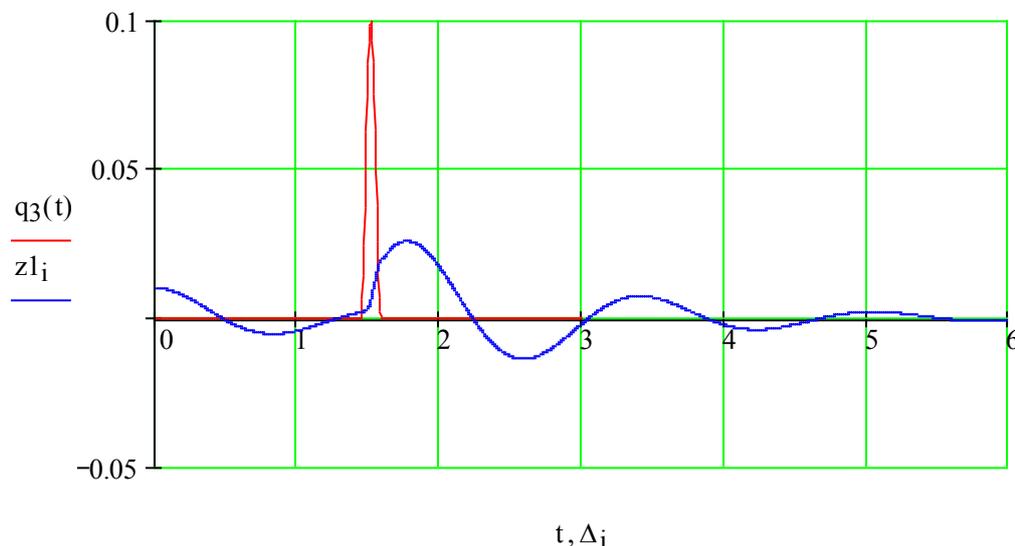


Рис3.4 Перемещение подрессоренной части автомобиля при оптимальных параметрах передней подвески

3.3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается планирование эксперимента?
2. Что является математической моделью объекта исследования?
3. Что называется фактором, какие виды факторов вы знаете?
4. Что такое оптимизация?
5. Как выбираются уровни факторов и интервалы варьирования?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Васильков Ю.В., Василькова Н.Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании: Учеб. Пособие. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 256 с.

4. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА
«MATHCAD

5. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА.
АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА «МАТНСАД

