**Федеральное государственное бюджетное**

**образовательное учреждение**

**Нижегородский государственный технический**

**университет им. Р.Е. Алексеева**

#### КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Информатика»

Тема: Численное и графическое моделирование

и исследование кинематических и динамических

характеристик механической системы

**вариант 27**

**Руководитель**

*Балакина Н.А.*

(подпись)(фамилия, и.,о.)

« » 2019г.

(дата)

**Студент**  *Каночкин М.М.*

(фамилия, и.,о.)

*А18-ЭТКз*

(подпись)(группа)

« » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2019г.

(дата)

Работа защищена « » 2019г.

c оценкой

Зачетная книжка № \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Н. Новгород

2019 г.

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. Алексеева

АВТОЗАВОДСКАЯ ВЫСШАЯ ШКОЛА

УПРАВЛЕНИЯ и ТЕХНОЛОГИЙ

**Пояснительная записка**

к курсовой работе по курсу «Информатика»

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество студента)

Кафедра «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА»

Шифр студента \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дата защиты работы \_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20 г.

Дата повторной защиты \_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20 г.

Номер \_\_\_\_\_\_\_\_\_ и дата \_\_\_\_\_\_\_\_\_ регистрации работы на кафедре

**Содержание**

Введение

1.Постановка задачи

2. Модели механической системы

2.1Физическая модель системы

2.2 Процесс работы и силы, возникающие в системе

2.3 Упрощенная физическая модель всей системы

2.4 Упрощенные физическая и геометрическая модели упругогоколеса

2.5 Физические законы, описывающие процессы в системе

2.6 Математическая модель задачи

3. Этапы выполнения курсовой работы

3.1 Этап 1. Расчет координат центра упругого колеса и скорости их изменения по участкам траектории центра жесткого колеса

3.2 Этап 2. Расчет динамических характеристик механической системы

3.3 Этап 3. Исследование зависимости избыточного ускорения массивного тела от одного из параметров системы

**Введение**

В курсе «Информатика» изучались следующие разделы:

1. Принципы алгоритмизации и программирования.
2. Элементы численных методов, используемых в инженерных расчетах.
3. Работа пользователя в программных средах MicrosoftOffice, MathCAD, Excel и др. на примерах реализации численных методов.
4. Оформление результатов расчетов в указанных программных продуктах, в редакторе MicrosoftOffice, 3D-САПР AutodeskInventor и др.

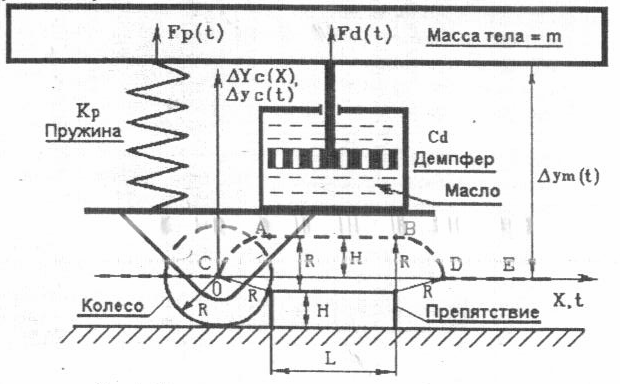
В данной курсовой работе на примере упрощенной инженерной задачи о механической системе применены знания, полученные при изучении указанных разделов и умение их применить в конкретных задачах.

Задача, поставленная в данной курсовой работе, не требует каких-либо специальных знаний, кроме уже изученных в курсе физики (законов механики) в математическом анализе:

1. элементарные теоремы геометрии для треугольников и окружностей;
2. законы механики Ньютона;
3. закон Гука для упругой пружины;
4. закон сопротивления движению в вязких жидкостях;
5. сведения о простейших дифференциальных уравнениях.

**1. Постановка задачи**

В данной работе рассматривается задача расчета и исследования кинематических идинамических характеристик механической системы, схема которойизображена на рисунке 1.



*Рис. 1. Кинематическая схема механической*

*системы и траектория центра жесткого колеса*

**Система содержит:**

* массивное жесткое тело массой *m*;
* жесткую опору и жесткое неподвижное препятствие;
* упругое колесо радиусом *R;*
* пружинно-демпферный амортизатор, состоящий из параллельно соединен­ных пружины и демпфера; амортизатор жестко соединен с массивным телом и шарнирно соединен с колесом.

**Основные допущения:**

* 1. Массы всех частей амортизатора и колеса значительно меньше массы мас­сивного тела, поэтому их массами можно пренебречь.
  2. Вся система перемещается по горизонтали с малой постоянной скоростью, а по вертикали – с переменной скоростью без вращения вокруг любых то­чек или осей за счет дополнительных связей, не изображённых на рисунке 1.
  3. При малой горизонтальной скорости *Vх* и достаточно большой массе тела *т* колесо постоянно соприкасается с опорой и/или с препятствием (то есть колесо не подпрыгивает и не летит по воздуху).
  4. Начало декартовой системы координат расположим в центре жесткого ко­леса (в точке *С)* при первом соприкосновении колеса с препятствием.
  5. Изменение реакции пружины *ΔFpr(l)* линейно зависит от изменения ее дли­ны *ΔLpr(t).*
  6. Реакция демпфера *Fd(t)* линейно зависит от скорости перемещения поршня относительно корпуса демпфера.

**2. Модели механической системы**

**2.1.Физическая модель системы**

Физической моделью системы называется качественное описание явлений, происходящих при функционировании того или иного механизма, прибора или другого изделия.Физической модели соответствуют:

1. рисунки, эскизы, чертежи, схемы изделия;
2. перечень физических явлений, законов, соответствующих процессу функ­ционирования изделия;
3. описание процесса функционирования изделия, а также физических вели­чин (координаты, скорости, ускорения, силы и др.).

**2.2. Процесс работы и силы, возникающие в системе**

До первого соприкосновения колеса с препятствием вся механическая сис­тема движется равномерно и прямолинейно с горизонтальной скоростью *Vх.* Упругое колесо и пружина находятся в сжатом состоянии под действием силы тяжести массивного тела. Демпфер находится в некотором среднем положении.

При преодолении препятствия и далее на тело массой *т* действуют сле­дующие внешние силы:

1. Неизменная сила тяжести*Pm*массивного тела.
2. Переменная сила сжатия пружины *Fp(t),* возникающая за счет изменения длины пружины.
3. Переменная сила жидкого сопротивления демпфера *Fd(t),* возникающая за счет переменной скорости изменения длины пружины.
4. Сила инерции *Fm(t),* обусловленная наличием массивного тела и его пере­менным ускорением, вычисляемая по 2-му закону Ньютона.

**2.3. Упрощенная физическая модель всей системы**

Механическую систему, изображенную на рисунке, можно приближенно представить в виде двух жестко соединенных частей:

1. препятствие + упругое колесо,
2. пружинно-демпферный амортизатор + массивное тело.

Вертикальное перемещение оси колеса и скорость его изменения переда­ются через шарнирную связь нижней части демпфера. Это приводит к возник­новению вертикально направленных избыточных внешних сил сжатия пружины *ΔFp(l)* и жидкого трения демпфера *Fd(t),* действующих на массивное тело.

**2.4. Упрощенные физическая и геометрическая модели упругого колеса**

Упругое колесо состоит из жесткого диска, жесткого обода и упругой пневматической шины. В исходном состоянии упругое колесо прижато к опоре под действием силы тяжести массивного тела. В результате этого колесо имеет не точечный контакт с опорой, а некоторую площадку сцепления колеса с опорой

В процессе преодоления препятствия площадка сцепления упругого колеса постепенно изменит свою форму так, что одна ее часть сначала расположена на опоре, а другая – на части препятствия. Это происходит за счет упругости ши­ны, которая зависит от избыточного давления воздуха внутри шины. Затем мо­жет оказаться, что вся площадка сцепления колеса будет целиком расположена на препятствии, после чего изменение формы площадки сцепления будет про­исходить в обратном порядке.

Жесткость шины как минимум на порядок больше жесткости пружины амортизатора. Поэтому упрощенную модель формирования траектории *Δys(t)* упругого колеса можно представить в виде двух последовательно выполняемых операций:

Формирование траектории *Δyc(t)* оси жесткого колеса (без учета упругости шины) на основе только геометрической модели препятствия и радиуса колеса.

Формирование сглаженной траектории *Δys(t)* оси упругого колеса путем скользящего взвешенного усреднения траектории *Δyc(t)* оси жесткого колеса *Δус(х)* и *Δyc(t).*

Колесо полностью исключает скачки (ступеньки) на траектории оси жесткого колеса *ΔYc (X),* которые есть на препятствии. Однако, на траектории *ΔYc(Х)* возможны скачки скорости изменения траектории оси жесткого колеса.

При обтекании выступающих углов препятствия траектория *ΔУс(Х)* содержит участки, имеющие форму дуг окружностей, радиус которых равен радиусу колеса *R,* а их центры находятся в точках соприкосновения с препятсвием*.*

При необходимости рассчета координат *(X1, Y1)* границ *I-го* и *(I+1*)-го участков траектории *ΔYc(X)*нужно решить уравнение:*ΔYcI(X)* – *ΔYc(I+1)(X)=0* при заданном начальном значении *X=X*нач.

**2.5 Физические законы, описывающие процессы в системе**

1. Принцип Даламбера - сумма всех внешних сил, действующих на массивное тело, равняется силе инерции этого тела;

2. 2-й закон Ньютона для силы инерции;

3. закон Гука для сжатия пружины;

4. закон сопротивления движению тела в вязкой жидкости.

**2.6. Математическая модель задачи**

Математической моделью задачи называется набор формул, уравнений, систем алгебраических или дифференциальных уравнений, отражающих физи­ческие процессы и законы, использованные в физической модели.

В данной работе эти математические выражения отражают перечисленные выше физические законы.

**3. Этапы выполнения курсовой работы**

Работа в целом состоит из следующих взаимно связанных подзадач:

1. **Расчет** траектории центра жесткого колеса (относительные координаты траектории *ΔYс (X)* и зависимость от времени *Δyc(t)* с учетом только формы препятствия, радиуса колеса *R*и горизонтальной скорости *Vx)*.
2. **Расчет** сглаженной траектории оси упругого колеса (зависимость от времени *Δys(t)* и скорость ее изменения *Vs(t)* = *d/dt[Ays(t)]).*
3. **Расчет** координат *Δym(t),* вертикальной составляющей скорости *Vym(t)* мас­сивного тела, а также вертикальной составляющей его ускорения *am(t).*
4. **Исследование** кинематических и динамических характеристик системы при изменении одного из ее параметров (по варианту27).

Вся курсовая работа выполнена в 3 этапа. Для выполнения каждого этапа работы использована своя группа исходных данных, а также результаты выпол­нения предыдущих этапов.

На каждом этапе работы часть исходных данных задается непосредствен­но, а другие – вычисляются либо через коэффициенты пропорциональности уже заданных или вычисленных величин, либо по другим формулам.

**Этап 1**

* 1. **Расчет координат центра упругого колеса и скорости их изменения по участкам траектории центра жесткого колеса**

Исходные данные для расчета кинематических характеристик системы:

R=0.33 Радиус колеса, [м];

H=0.4 Высота препятствия, [м];

L=4\*H; L=1.6 Длина препятствия, [м];

Vx=0.8 Горизонтальная скорость системы, [м/с];

cLs=0.4; Ls=cLs\*R; Ls=0.132 Длина сцепления колеса с опорой, [м];

Ts=Ls; Ts=0.132Эффективное время сглаживания траектории центра жесткого колеса, [с];

Xk=1.6 Конечное значение продольной координаты по

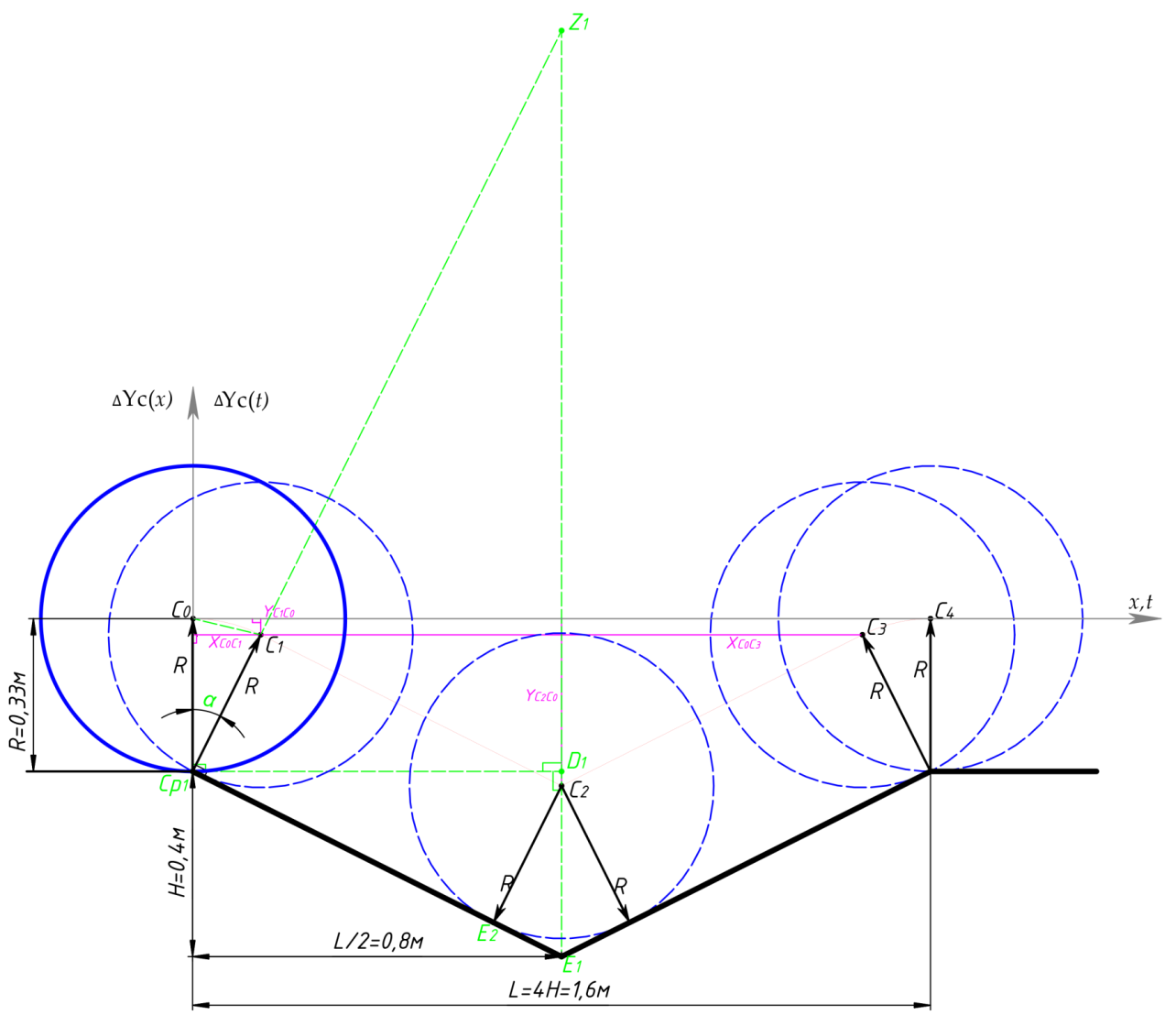
умолчанию [м]

tk=Xk/Vxtk=2 Конечное значение времени наблюдения [с] при

расчете кинематики системы

**Шаг 1**.**1**. **Расчет координаты точек**(центра жесткого колеса) при преодолении препятствия относительно его положения при соприкосновении колеса с препятствием

*из приложения AutodeskInventor*



*Рис. 2. Эскиз ожидаемой траектории центра жесткого колеса*

1.1.1 Расчет точки координат **:**

1. ; ;
2. По теореме Пифагора

Таким образом, координаты точки ()

1.1.2 Расчет точки координат **:**

По теореме синусов

Таким образом, координаты точки ()

1.1.3 Расчет точки координат **:**

Таким образом, координаты точки ()

1.1.4 Расчет точки координат **:**

Таким образом, координаты точки ()

**Шаг 1**.**2**. **Расчет уравненийтраектории ∆Y(x) участков**

1.2.1 Расчет уравнения траектории 1-го участка **:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Проверка | | |
| начало участка | центр участка | конец участка |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Вывод:**т.к. результаты расчетов ∆Y(x) на границах 1-го участка совпадают с заданными, а в центре участка значение ∆Y(x)совпадает с чертежом, то функция ∆Y(x) найдена верно.

1.2.2 Расчет уравнения траектории 1-го участка **:**

Используя метод линейной интерполяции

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Проверка | | |
| начало участка | центр участка | конец участка |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Вывод:** т.к. результаты расчетов ∆Y(x) на границах 2-го участка совпадают с заданными, а в центре участка значение ∆Y(x)совпадает с чертежом, то функция ∆Y(x) найдена верно.

1.2.3 Расчет уравнения траектории 1-го участка **:**

Используя метод линейной интерполяции

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Проверка | | |
| начало участка | центр участка | конец участка |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Вывод:** т.к. результаты расчетов ∆Y(x) на границах 3-го участка совпадают с заданными, а в центре участка значение ∆Y(x)совпадает с чертежом, то функция ∆Y(x) найдена верно.

1.2.1 Расчет уравнения траектории 1-го участка **:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Проверка | | |
| начало участка | центр участка | конец участка |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Вывод:** т.к. результаты расчетов ∆Y(x) на границах 1-го участка совпадают с заданными, а в центре участка значение ∆Y(x) совпадает с чертежом, то функция ∆Y(x) найдена верно.

С помощью полученных уравнений (шаг 1.2)траектории движения центра жесткого колеса научастках составим таблицу в MicrosoftExcel и построим график траектории движения центра жесткого колеса**.**

Таблица 1

Значения координат

перемещения центра жесткого колеса

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **x** | **y** | **№** | **x** | **y** | **№** | **x** | **y** | **№** | **x** | **y** |
| **1** | 0 | 0 | **16** | 0,4 | -0,161038 | **31** | 0,8 | -0,36104 | **46** | 1,2 | -0,16104 |
| **2** | 0,03 | -0,001079 | **17** | 0,43 | -0,174371 | **32** | 0,83 | -0,347707 | **47** | 1,23 | -0,147706 |
| **3** | 0,05 | -0,004338 | **18** | 0,45 | -0,187705 | **33** | 0,85 | -0,334373 | **48** | 1,25 | -0,134373 |
| **4** | 0,08 | -0,009844 | **19** | 0,48 | -0,201038 | **34** | 0,88 | -0,32104 | **49** | 1,28 | -0,121040 |
| **5** | 0,11 | -0,017715 | **20** | 0,51 | -0,214372 | **35** | 0,91 | -0,307707 | **50** | 1,31 | -0,107706 |
| **6** | 0,13 | -0,028135 | **21** | 0,53 | -0,227705 | **36** | 0,93 | -0,294373 | **51** | 1,33 | -0,094373 |
| **7** | 0,16 | -0,041037 | **22** | 0,56 | -0,241039 | **37** | 0,96 | -0,28104 | **52** | 1,36 | -0,08104 |
| **8** | 0,19 | -0,05437 | **23** | 0,59 | -0,254372 | **38** | 0,99 | -0,267707 | **53** | 1,39 | -0,067706 |
| **9** | 0,21 | -0,067704 | **24** | 0,61 | -0,267706 | **39** | 1,01 | -0,254373 | **54** | 1,41 | -0,054373 |
| **10** | 0,24 | -0,081037 | **25** | 0,64 | -0,281039 | **40** | 1,04 | -0,24104 | **55** | 1,44 | -0,04104 |
| **11** | 0,27 | -0,094371 | **26** | 0,67 | -0,294373 | **41** | 1,07 | -0,227707 | **56** | 1,47 | -0,025918 |
| **12** | 0,29 | -0,107704 | **27** | 0,69 | -0,307706 | **42** | 1,09 | -0,214373 | **57** | 1,49 | -0,016811 |
| **13** | 0,32 | -0,121038 | **28** | 0,72 | -0,32104 | **43** | 1,12 | -0,20104 | **58** | 1,52 | -0,009559 |
| **14** | 0,35 | -0,134371 | **29** | 0,75 | -0,334373 | **44** | 1,15 | -0,187707 | **59** | 1,55 | -0,004282 |
| **15** | 0,37 | -0,147705 | **30** | 0,77 | -0,347707 | **45** | 1,17 | -0,174373 | **60** | 1,57 | -0,001076 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | **61** | 1,6 | 0 |

*Рис. 2. Траектория движения центра жесткого колеса*

**Вывод**. Из графика траектории движения жесткого колеса видно:

1. Траектория более сглаженная и плавная, чем само препятствие.
2. График траектории движения жесткого колеса соответствует реальной траектории движения жесткого колеса.
3. При преодолении препятствия жестким колесом происходит сглаживание острых углов препятствия.

**Шаг 1**.**2**.**Расчет зависимости от времени высоты центра жесткого колеса ∆yc(t).**

Функция зависимости от времени высоты [м] оси жесткого колеса при любом времени t: ∆yc(t)= ∆Yc(t\*Vx)

tn=0(начальное значение времениt)

tk= 2 (конечное значение времениt)

ht=(tk-tn)/60 (шаг времениt)

ht=0.033333333

tc = tn, ht..tk

С помощью выведенных (шаг 1.1) уравнений траектории движения центра жесткого колеса на участках A-B, B-Cи C-D и формулы зависимости от времени высоты оси жесткого колеса ∆yc(t)= ∆Yc(t\*Vx) при любом времени t составим таблицу в MicrosoftExcel и получим графическое изображение зависимости высоты центра жесткого колеса от времени.

*Таблица 2*

Значения высоты центра жесткого колеса от времени

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **T** | **y(t\*Vx)** | **№** | **t** | **y(t\*Vx)** | **№** | **t** | **y(t\*Vx)** | **№** | **t** | **y(t\*Vx)** |
| **1** | 0 | 0 | **16** | 0,5 | -0,16104 | **31** | 1 | -0,36104 | **46** | 1,5 | -0,16104 |
| **2** | 0,0333 | -0,00108 | **17** | 0,5333 | -0,17437 | **32** | 1,0333 | -0,34771 | **47** | 1,5333 | -0,14771 |
| **3** | 0,0666 | -0,00434 | **18** | 0,5666 | -0,1877 | **33** | 1,0666 | -0,33437 | **48** | 1,5666 | -0,13437 |
| **4** | 0,1 | -0,00984 | **19** | 0,6 | -0,20104 | **34** | 1,1 | -0,32104 | **49** | 1,6 | -0,12104 |
| **5** | 0,1333 | -0,01771 | **20** | 0,6333 | -0,21437 | **35** | 1,1333 | -0,30771 | **50** | 1,6333 | -0,10771 |
| **6** | 0,1666 | -0,02814 | **21** | 0,6666 | -0,22771 | **36** | 1,1666 | -0,29437 | **51** | 1,6666 | -0,09437 |
| **7** | 0,2 | -0,04104 | **22** | 0,7 | -0,24104 | **37** | 1,2 | -0,28104 | **52** | 1,7 | -0,08104 |
| **8** | 0,2333 | -0,05437 | **23** | 0,7333 | -0,25437 | **38** | 1,2333 | -0,26771 | **53** | 1,7333 | -0,06771 |
| **9** | 0,2666 | -0,0677 | **24** | 0,7666 | -0,26771 | **39** | 1,2666 | -0,25437 | **54** | 1,7666 | -0,05437 |
| **10** | 0,3 | -0,08104 | **25** | 0,8 | -0,28104 | **40** | 1,3 | -0,24104 | **55** | 1,8 | -0,04104 |
| **11** | 0,3333 | -0,09437 | **26** | 0,8333 | -0,29437 | **41** | 1,3333 | -0,22771 | **56** | 1,8333 | -0,02592 |
| **12** | 0,3666 | -0,1077 | **27** | 0,8666 | -0,30771 | **42** | 1,3666 | -0,21437 | **57** | 1,8666 | -0,01681 |
| **13** | 0,4 | -0,12104 | **28** | 0,9 | -0,32104 | **43** | 1,4 | -0,20104 | **58** | 1,9 | -0,00956 |
| **14** | 0,4333 | -0,13437 | **29** | 0,9333 | -0,33437 | **44** | 1,4333 | -0,18771 | **59** | 1,9333 | -0,00428 |
| **15** | 0,4666 | -0,1477 | **30** | 0,9666 | -0,34771 | **45** | 1,4666 | -0,17437 | **60** | 1,9666 | -0,00108 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | **61** | 2 | 0 |

*Рис 3. Зависимость высоты центра жесткого колеса от времени*

**Вывод**. из графика зависимость высоты центра жесткого колеса от времени видно:

1. Траектория более растянута по сравнению с траекторией Рис2.

**Шаг 1**.**3**.**Расчет траектории центра упругого колеса ∆ys(t)**

График функции Wys(τ),сглаживающей зависимости от времени∆yc(t) – высоты центра упругого колеса (–2\*Ts ≤ τ ≤ 0):



ПРОВЕРКА нормировки Wys(τ) (вручную)



*Наши данные*:

Ts=0,132 (эффективное время сглаживания траектории упругими колесами)

hτ=Ts/60 hτ=0,0022τn= – 2\*TSτn= –0,264

τk=0 τ=τn, τn+hτ.. τk

Cоставим таблицу в MicrosoftExcel и получим графическое изображение сглаживающей функцииWys(τ).

*Таблица 3*

Значения сглаживающей функции

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **τ** | **Wys(τ)** | **№** | **τ** | **Wys(τ)** | **№** | **τ** | **Wys(τ)** | **№** | **τ** | **Wys(τ)** |
| **1** | -0,264 | 0 | **16** | -0,198 | 3,787878 | **31** | -0,132 | 7,575757 | **46** | -0,066 | 3,787878 |
| **2** | -0,2596 | 0,02075 | **17** | -0,1936 | 4,183819 | **32** | -0,1276 | 7,555007 | **47** | -0,0616 | 3,391937 |
| **3** | -0,2552 | 0,082774 | **18** | -0,1892 | 4,575423 | **33** | -0,1232 | 7,492983 | **48** | -0,0572 | 3,000334 |
| **4** | -0,2508 | 0,185391 | **19** | -0,1848 | 4,958397 | **34** | -0,1188 | 7,390365 | **49** | -0,0528 | 2,617359 |
| **5** | -0,2464 | 0,327479 | **20** | -0,1804 | 5,328547 | **35** | -0,1144 | 7,248278 | **50** | -0,0484 | 2,247209 |
| **6** | -0,242 | 0,507479 | **21** | -0,176 | 5,681818 | **36** | -0,11 | 7,068278 | **51** | -0,044 | 1,893939 |
| **7** | -0,2376 | 0,723420 | **22** | -0,1716 | 6,014338 | **37** | -0,1056 | 6,852337 | **52** | -0,0396 | 1,561419 |
| **8** | -0,2332 | 0,972936 | **23** | -0,1672 | 6,322464 | **38** | -0,1012 | 6,602821 | **53** | -0,0352 | 1,253293 |
| **9** | -0,2288 | 1,253293 | **24** | -0,1628 | 6,602821 | **39** | -0,0968 | 6,322464 | **54** | -0,0308 | 0,972936 |
| **10** | -0,2244 | 1,561419 | **25** | -0,1584 | 6,852337 | **40** | -0,0924 | 6,014338 | **55** | -0,0264 | 0,723420 |
| **11** | -0,22 | 1,893939 | **26** | -0,154 | 7,068278 | **41** | -0,088 | 5,681818 | **56** | -0,022 | 0,507479 |
| **12** | -0,2156 | 2,247209 | **27** | -0,1496 | 7,248278 | **42** | -0,0836 | 5,328547 | **57** | -0,0176 | 0,327479 |
| **13** | -0,2112 | 2,617359 | **28** | -0,1452 | 7,390365 | **43** | -0,0792 | 4,958397 | **58** | -0,0132 | 0,185391 |
| **14** | -0,2068 | 3,000334 | **29** | -0,1408 | 7,492983 | **44** | -0,0748 | 4,575423 | **59** | -0,0088 | 0,082774 |
| **15** | -0,2024 | 3,391937 | **30** | -0,1364 | 7,555007 | **45** | -0,0704 | 4,183819 | **60** | -0,0044 | 0,020750 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  | **61** | -3E-16 | 0 |

*Рис. 4.Сглаживающая весовая функцияWys(τ)*

**Вывод.** На графике видно, что функция Wys(τ) действительно является сглаживающей (сглаживает зависимость высоты центра упругого колеса от времени)

Ts – эффективное время сглаживания траектории упругими колесами).

**Расчет траектории центра упругого колеса**

Траекторию центра упругого колеса ∆ys(t) [мм] рассчитаем по формуле:

где ∆yс – траектория движения центра жесткого колеса

Tn= 0 (начальное значение)

Tk=2 (конечное значение)

ht=0.0333 (шаг)

С помощью выведенных (шаг 1.1) уравнений траектории движения центра жесткого колеса на участках A-B, B-C и C-D и формулы траектории центра упругого колеса ∆ys(t) при любом времени t составим таблицу в MicrosoftExcel и получим с помощью данных таблицы графическое изображение траектории движений центров жесткого и упругого колес.

Анализируем полученный результат (графики траектории центра жесткого колеса и траектории центра упругого колеса) и сравним эти графики.

*Таблица 4*

Значения траекторий движения центров жесткого и упругого колес

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **τ** | **Wys(τ)** | **t** | **ys(t)** | **yc(t)** |
| **1** | -0,264 | 0 | 0 | -0,02 | 0 |
| **2** | -0,2596 | 0,02075 | 0,033333 | -0,012 | -1,08E-03 |
| **3** | -0,2552 | 0,082774 | 0,066667 | -6,48E-03 | -4,34E-03 |
| **4** | -0,2508 | 0,185391 | 0,1 | -3,24E-03 | -9,84E-03 |
| **5** | -0,2464 | 0,327479 | 0,133333 | -2,23E-03 | -0,018 |
| **6** | -0,242 | 0,507479 | 0,166667 | -3,42E-03 | -0,028 |
| **7** | -0,2376 | 0,723420 | 0,2 | -6,84E-03 | -0,041 |
| **8** | -0,2332 | 0,972936 | 0,233333 | -0,013 | -0,054 |
| **9** | -0,2288 | 1,253293 | 0,266667 | -0,021 | -0,068 |
| **10** | -0,2244 | 1,561419 | 0,3 | -0,031 | -0,081 |
| **11** | -0,22 | 1,893939 | 0,333333 | -0,042 | -0,094 |
| **12** | -0,2156 | 2,247209 | 0,366667 | -0,055 | -0,108 |
| **13** | -0,2112 | 2,617359 | 0,4 | -0,068 | -0,121 |
| **14** | -0,2068 | 3,000334 | 0,433333 | -0,082 | -0,134 |
| **15** | -0,2024 | 3,391937 | 0,466667 | -0,095 | -0,148 |
| **16** | -0,198 | 3,787878 | 0,5 | -0,108 | -0,161 |
| **17** | -0,1936 | 4,183819 | 0,533333 | -0,122 | -0,174 |
| **18** | -0,1892 | 4,575423 | 0,566667 | -0,135 | -0,188 |
| **19** | -0,1848 | 4,958397 | 0,6 | -0,148 | -0,201 |
| **20** | -0,1804 | 5,328547 | 0,633333 | -0,162 | -0,214 |
| **21** | -0,176 | 5,681818 | 0,666667 | -0,175 | -0,228 |
| **22** | -0,1716 | 6,014338 | 0,7 | -0,188 | -0,241 |
| **23** | -0,1672 | 6,322464 | 0,733333 | -0,202 | -0,254 |
| **24** | -0,1628 | 6,602821 | 0,766667 | -0,215 | -0,268 |
| **25** | -0,1584 | 6,852337 | 0,8 | -0,228 | -0,281 |
| **26** | -0,154 | 7,068278 | 0,833333 | -0,242 | -0,294 |
| **27** | -0,1496 | 7,248278 | 0,866667 | -0,255 | -0,308 |
| **28** | -0,1452 | 7,390365 | 0,9 | -0,268 | -0,321 |
| **29** | -0,1408 | 7,492983 | 0,933333 | -0,282 | -0,334 |
| **30** | -0,1364 | 7,555007 | 0,966667 | -0,295 | -0,348 |
| **31** | -0,132 | 7,575757 | 1 | -0,308 | -0,361 |
| **32** | -0,1276 | 7,555007 | 1,033333 | -0,321 | -0,348 |
| **33** | -0,1232 | 7,492983 | 1,066667 | -0,334 | -0,334 |
| **34** | -0,1188 | 7,390365 | 1,1 | -0,342 | -0,321 |
| **35** | -0,1144 | 7,248278 | 1,133333 | -0,345 | -0,308 |
| **36** | -0,11 | 7,068278 | 1,166667 | -0,342 | -0,294 |
| **37** | -0,1056 | 6,852337 | 1,2 | -0,333 | -0,281 |
| **38** | -0,1012 | 6,602821 | 1,233333 | -0,32 | -0,268 |
| **39** | -0,0968 | 6,322464 | 1,266667 | -0,307 | -0,254 |
| **40** | -0,0924 | 6,014338 | 1,3 | -0,294 | -0,241 |
| **41** | -0,088 | 5,681818 | 1,333333 | -0,281 | -0,228 |
| **42** | -0,0836 | 5,328547 | 1,366667 | -0,267 | -0,214 |
| **43** | -0,0792 | 4,958397 | 1,4 | -0,254 | -0,201 |
| **44** | -0,0748 | 4,575423 | 1,433333 | -0,241 | -0,188 |
| **45** | -0,0704 | 4,183819 | 1,466667 | -0,227 | -0,174 |
| **46** | -0,066 | 3,787878 | 1,5 | -0,214 | -0,161 |
| **47** | -0,0616 | 3,391937 | 1,533333 | -0,201 | -0,148 |
| **48** | -0,0572 | 3,000334 | 1,566667 | -0,187 | -0,134 |
| **49** | -0,0528 | 2,617359 | 1,6 | -0,174 | -0,121 |
| **50** | -0,0484 | 2,247209 | 1,633333 | -0,161 | -0,108 |
| **51** | -0,044 | 1,893939 | 1,666667 | -0,147 | -0,094 |
| **52** | -0,0396 | 1,561419 | 1,7 | -0,134 | -0,081 |
| **53** | -0,0352 | 1,253293 | 1,733333 | -0,121 | -0,068 |
| **54** | -0,0308 | 0,972936 | 1,766667 | -0,107 | -0,054 |
| **55** | -0,0264 | 0,723420 | 1,8 | -0,094 | -0,041 |
| **56** | -0,022 | 0,507479 | 1,833333 | -0,081 | -0,026 |
| **57** | -0,0176 | 0,327479 | 1,866667 | -0,067 | -0,017 |
| **58** | -0,0132 | 0,185391 | 1,9 | -0,054 | -9,56E-03 |
| **59** | -0,0088 | 0,082774 | 1,933333 | -0,041 | -4,28E-03 |
| **60** | -0,0044 | 0,020750 | 1,966667 | -0,029 | -1,08E-03 |
| **61** | -2,9E-16 | 0 | 2 | -0,019 | 0 |

*Рис.5. Траектории: 1) центра жесткого колеса ∆yс(t)(синяя линия)*

*2) центра упругого колеса ∆ys(t)(красная линия)*

**Вывод**.Изрис. 5 видим, что траектория центра упругого колеса ∆ys(t):

1. Не имеет скачков скорости ее изменения;
2. Запаздывает на спуске и опережает при подъёме ∆yc(t) на величину Ts – эффективное время сглаживания траектории упругими колесами.

**Шаг 1**.**4**. **Расчет сглаженной скорости изменения высоты центра упругого колеса**

График функции Wvs(τ), одновременносглаживающей и дифференцирующей зависимость от времени ∆yс(t) при (–2\*ts ≤ τ ≤ 0)методом скользящего усреднения и дифференцирования. Для составления таблицы зависимости сглаженной скорости изменения высоты центра упругого колеса от τ (при при –2\*Ts ≤ τ ≤ 0) в MicrosoftExcel воспользуемся формулой и построим график функции Wvs(τ).





скорость изменения центра жесткого колеса



скорость изменения центра упругого колеса

*Таблица 5*

Значения скорости изменения

высоты центра упругого колеса от τ

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **τ** | **t** | **Wvs(τ)** | **Vyc(t)** | **Vys(t)** |
| **1** | -0,264 | 0 | -2,20897E-14 | 0,268 | -4,85E-05 |
| **2** | -0,2596 | 0,033333 | -9,423377304 | 0,326 | 0,067 |
| **3** | -0,2552 | 0,066667 | -18,74351011 | 0,367 | 0,134 |
| **4** | -0,2508 | 0,1 | -27,85828511 | 0,39 | 0,2 |
| **5** | -0,2464 | 0,133333 | -36,6678389 | 0,398 | 0,261 |
| **6** | -0,242 | 0,166667 | -45,07565217 | 0,4 | 0,312 |
| **7** | -0,2376 | 0,2 | -52,98960717 | 0,4 | 0,351 |
| **8** | -0,2332 | 0,233333 | -60,32299694 | 0,4 | 0,377 |
| **9** | -0,2288 | 0,266667 | -66,99547533 | 0,4 | 0,391 |
| **10** | -0,2244 | 0,3 | -72,93393727 | 0,4 | 0,397 |
| **11** | -0,22 | 0,333333 | -78,07331974 | 0,4 | 0,399 |
| **12** | -0,2156 | 0,366667 | -82,35731458 | 0,4 | 0,4 |
| **13** | -0,2112 | 0,4 | -85,73898544 | 0,4 | 0,4 |
| **14** | -0,2068 | 0,433333 | -88,18128204 | 0,4 | 0,4 |
| **15** | -0,2024 | 0,466667 | -89,65744606 | 0,4 | 0,4 |
| **16** | -0,198 | 0,5 | -90,15130434 | 0,4 | 0,4 |
| **17** | -0,1936 | 0,533333 | -89,65744606 | 0,4 | 0,4 |
| **18** | -0,1892 | 0,566667 | -88,18128204 | 0,4 | 0,4 |
| **19** | -0,1848 | 0,6 | -85,73898544 | 0,4 | 0,4 |
| **20** | -0,1804 | 0,633333 | -82,35731458 | 0,4 | 0,4 |
| **21** | -0,176 | 0,666667 | -78,07331974 | 0,4 | 0,4 |
| **22** | -0,1716 | 0,7 | -72,93393727 | 0,4 | 0,4 |
| **23** | -0,1672 | 0,733333 | -66,99547533 | 0,4 | 0,4 |
| **24** | -0,1628 | 0,766667 | -60,32299694 | 0,392 | 0,4 |
| **25** | -0,1584 | 0,8 | -52,98960717 | 0,333 | 0,4 |
| **26** | -0,154 | 0,833333 | -45,07565217 | 0,199 | 0,396 |
| **27** | -0,1496 | 0,866667 | -36,6678389 | 8,01E-03 | 0,382 |
| **28** | -0,1452 | 0,9 | -27,85828511 | -0,185 | 0,343 |
| **29** | -0,1408 | 0,933333 | -18,74351011 | -0,325 | 0,265 |
| **30** | -0,1364 | 0,966667 | -9,423377304 | -0,389 | 0,146 |
| **31** | -0,132 | 1 | -6,29519E-13 | -0,4 | 2,74E-06 |
| **32** | -0,1276 | 1,033333 | 9,423377304 | -0,4 | -0,146 |
| **33** | -0,1232 | 1,066667 | 18,74351011 | -0,4 | -0,265 |
| **34** | -0,1188 | 1,1 | 27,85828511 | -0,4 | -0,343 |
| **35** | -0,1144 | 1,133333 | 36,6678389 | -0,4 | -0,382 |
| **36** | -0,11 | 1,166667 | 45,07565217 | -0,4 | -0,396 |
| **37** | -0,1056 | 1,2 | 52,98960717 | -0,4 | -0,4 |
| **38** | -0,1012 | 1,233333 | 60,32299694 | -0,4 | -0,4 |
| **39** | -0,0968 | 1,266667 | 66,99547533 | -0,4 | -0,4 |
| **40** | -0,0924 | 1,3 | 72,93393727 | -0,4 | -0,4 |
| **41** | -0,088 | 1,333333 | 78,07331974 | -0,4 | -0,4 |
| **42** | -0,0836 | 1,366667 | 82,35731458 | -0,4 | -0,4 |
| **43** | -0,0792 | 1,4 | 85,73898544 | -0,4 | -0,4 |
| **44** | -0,0748 | 1,433333 | 88,18128204 | -0,4 | -0,4 |
| **45** | -0,0704 | 1,466667 | 89,65744606 | -0,4 | -0,4 |
| **46** | -0,066 | 1,5 | 90,15130434 | -0,4 | -0,4 |
| **47** | -0,0616 | 1,533333 | 89,65744606 | -0,4 | -0,4 |
| **48** | -0,0572 | 1,566667 | 88,18128204 | -0,401 | -0,4 |
| **49** | -0,0528 | 1,6 | 85,73898544 | -0,404 | -0,4 |
| **50** | -0,0484 | 1,633333 | 82,35731458 | -0,4 | -0,4 |
| **51** | -0,044 | 1,666667 | 78,07331974 | -0,377 | -0,401 |
| **52** | -0,0396 | 1,7 | 72,93393727 | -0,332 | -0,4 |
| **53** | -0,0352 | 1,733333 | 66,99547533 | -0,269 | -0,396 |
| **54** | -0,0308 | 1,766667 | 60,32299694 | -0,197 | -0,382 |
| **55** | -0,0264 | 1,8 | 52,98960717 | -0,129 | -0,356 |
| **56** | -0,022 | 1,833333 | 45,07565217 | -0,066 | -0,313 |
| **57** | -0,0176 | 1,866667 | 36,6678389 | -2,54E-03 | -0,258 |
| **58** | -0,0132 | 1,9 | 27,85828511 | 0,061 | -0,195 |
| **59** | -0,0088 | 1,933333 | 18,74351011 | 0,123 | -0,129 |
| **60** | -0,0044 | 1,966667 | 9,423377304 | 0,183 | -0,064 |
| **61** | -2,9E-16 | 2 | 6,29021E-13 | 0,24 | -4,22E-04 |

*Рис. 6. Скорость Vys(t) изменения траектории центра упругого колеса*

**Вывод.**

1. Сглаживание графика функции Vys(t) действительно происходит благодаря амортизации.
2. Амортизация необходима из-за значительных величин скоростей жесткого колеса.
3. Скорость  упругого колеса запаздывает на время *Ts –* эффективное время сглаживания(с помощью этого моделируется пневматическая шина).

**Этап 2**

**Расчет динамических характеристик**

**механической системы**

Согласно принятым допущениям при малых изменениях длины пружины Δ*Lpr(t)* реакция пружины *(*Δ*Fpr)* находится по линейному закону Гука:

Δ*Fpr(t)=Kpr*Δ*Lpr(t)=Kpr [*Δ*ys(t)-* Δ*ym(t)].*

Здесь *Крr* – коэффициент восстанавливающей силы упругой пружины;

Δ*ys(t) –* ранее найденная временная зависимость относительной высоты оси упругого колеса.

Δ*ym(t) =ym(t)- ym(0)* – изменение начальной высоты массивного тела относительно назальной высоты *ym(0)* массивного тела при *t=0.*

При малых значениях *Vd–*скорости перемещения поршня силу Δ*Fd(t)* будем находить по линейному закону для силы сопротивления жидкого трения:

Δ*Fd(t) = – CdVd{t)= – Cd[Vym(t) – Vys{t)]*

В этой формуле знак силы Δ*Fd(t)* противоположен *Vd(t) –* скорости измене­ния расстояния от поршня до дна корпуса демпфера.

Здесь также обозначено: *Vym(t)* = *d/dt[*Δ*ym(t)]* и *Vys(t) = d/dt[*Δ*ys(t)] –*ско­рости изменения вертикальной координаты массивного тела и центра колеса.

Из физических соображений найдем систему, двух дифференци­альных уравнений относительно двух неизвестных функций Δ*ym(t)* и *Vym(t):*

1-е дифференциальное уравнение относительно Δ*ym(t)* и *Vym*получим из

определения скорости тела:

*d/dt[*Δ*ym(t)]* = *Vym(t)* (1)

2-е дифференциальное уравнение получим из 2-го закона Ньютона.

Произведение массы тела *т* на его ускорение *d/dt [Vym(t)]* равно алгебраи­ческой сумме всех внешних сил, действующих на это тело.

*d/dt[Vym(t)]=(1/m){Kpr [*Δ*ys(t)-* Δ*ym(t)]+ Cd [Vys(t)-Vym(t)]* (2)

Согласно **принципу Даламбера,** любое движущееся массивное тело находится в состоянии динамического (силового) равновесия, если сила инерции тела равна сумме всех внешних сил, действующих на это тело:

∆Fm(t)= ∆Fpr(t)+Fd(t), где ∆Fm(t) – **сила инерции** массивного **тела**, вычисляемая **по2-му закону Ньютона**:

∆Fm(t)=m\*(d/dtVym(t)); Vym(t) –вертикальная составляющая скорости тела;

∆Fpr(t)Kpr\*[∆ys(t) –∆ym(t)] – избыточная **сила сжатия пружины** (закон Гука);

Fd(t)=Cd\*[Vys(t) –Vym(t)] – **сила сопротивления** движению поршня **в жидкости** демпфера.

Неизвестные функции ∆ym(t) иVym(t)=d/dt∆ym(t)находятся из дифференциального уравнения 2-го порядка:

M\*(d2/dt2∆ym(t))=Cd\*(Vys(t) – d/dt∆ym(t))+Kpr\*(∆ys(t) –∆ym(t))

Исходные данные необходимые для расчета динамических характеристик системы(подготовка данных для решения дифференциального уравнения)

**m**=300 Масса тела по умолчанию m=300[кг]

**XС**=1,6 Конечная продольная координата препятствия [м]

**Tprep**=XС/Vx**Tprep**=2Время прохождения препятствия колесом [с]

**Tkoleb**=1 Период собственных колебаний системы (Tkoleb)

**cTau**=0,45 Отношение постоянной времени затухания колебаний

(Tau) к периоду собственных колебаний (Tkoleb)

(Tau<Tkoleb).

**Tau**=cTau\* Tkoleb**Tau**=0,45 Постоянная времени затухания колебаний [с]

**Расчет коэффициента демпфирования**Cd:

Cd=2m/Tau Cd=1333,33 [H\*с/м]

**Расчет коэффициента упругости пружины**Kpr:

**Kpr**=m\*[(2π/ Tkoleb)2+(1/Tau)2] Kpr=13333,33 [H/м]

Собственные колебания массивного тела

**fcos0(t)=e-t/Tau\*cos(2πt/ Tkoleb)**– реакция системы на

единичное вертикальное смещение

массивного тела на [1м]

**fsin0(t)=e-t/Tau\*sin(2πt/ Tkoleb)**–реакция системы на

единичную вертикальную скорость

массивного тела [1м/c]

Tkoleb=1 Период собственных колебаний [с]

[c] t=tn, ht..2\* Tkoleb

t=0,0.004..2

Tprep=2 Время прохождения препятствия колесом [с]

**Nt**=60 Число расчетных шагов по времени

**tn**=0 Начальное значение времени t

**tk**=2 Конечное значение времени t

шаг по времени: ht=(tk-tn)/Nt; ht=0,004

С помощью данных уравнений функций **fcos0(t) и fsin0(t)** при t=0,0.004..2составим таблицу зависимостей функций **fcos0(t) и fsin0(t)** от времени **t**вMicrosoftExcel. С помощью полученных данных таблицы построить графики функций зависимости **fcos0(t) и fsin0(t)** от времени **t.**

*Таблица 6*

*Значения функций собственных*

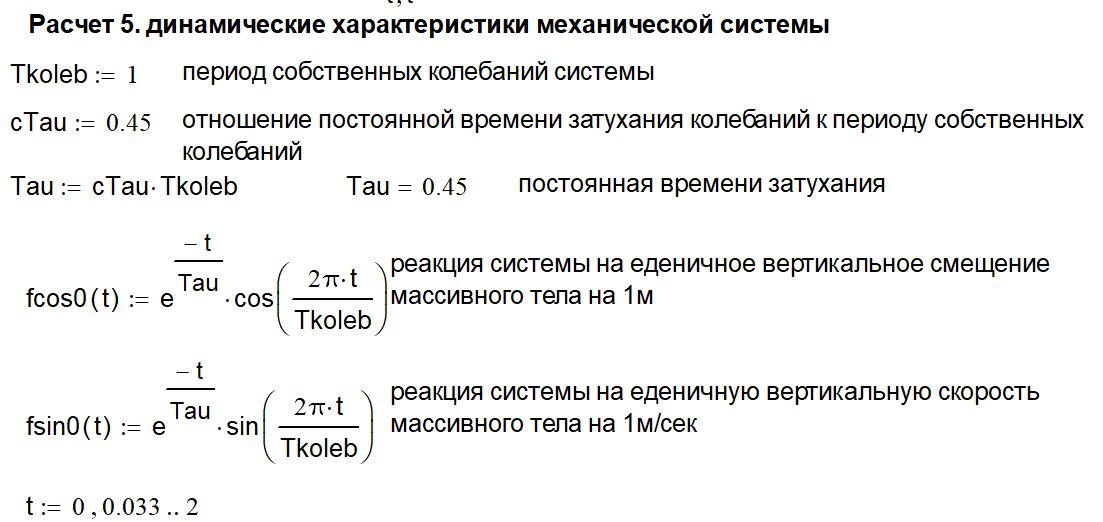
*колебаний массивного тела*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **t** | **fcos0(t)** | **fsin0(t)** |
| **1** | 0 | 1 | 0 |
| **2** | 0,033333 | 0,914495 | 0,16125 |
| **3** | 0,066667 | 0,8103 | 0,294925 |
| **4** | 0,1 | 0,693459 | 0,400369 |
| **5** | 0,133333 | 0,569605 | 0,477956 |
| **6** | 0,166667 | 0,443831 | 0,528937 |
| **7** | 0,2 | 0,32059 | 0,555279 |
| **8** | 0,233333 | 0,203639 | 0,559495 |
| **9** | 0,266667 | 0,096009 | 0,544492 |
| **10** | 0,3 | 3,15E-17 | 0,513417 |
|  | | | |
| **57** | 1,866667 | -0,01484 | -0,0054 |
| **58** | 1,9 | -0,0127 | -0,00733 |
| **59** | 1,933333 | -0,01043 | -0,00875 |
| **60** | 1,966667 | -0,00813 | -0,00969 |
| **61** | 2 | -0,00587 | -0,01017 |

*Рис 7.2 График собственных колебаний*

*массивного тела, полученный в приложении Excel*

*из приложения MathCAD*

**

**

*Рис 7.1 График собственных колебаний массивного тела, полученный в приложении MathCAD*

**Решение дифференциальных уравнений**

**для нахождения** *Vym(t)* и Δ*ym(t)*:

Приведем исходное значение дифференциального уравнения 2-го порядка к системе двух дифференциальных уравнений 1-го порядка в канонической форме (то есть в левых частях этих уравнений должны быть только первые производные от неизвестных функций ∆ym(t) и Vym(t)).

1-е дифф. уравнение получим из определения скорости тела:

d/dt∆ym(t)= Vym(t) (1)

2-eдифф. уравнение получим из принципа Даламбера:

d/dtVym(t)=(1/m)\*[Cd\*( Vys(t) –Vym(t))+Kpr\* (∆ys(t) – ∆ym(t))]

при нулевых начальных условиях (∆ym(0)=0 и Vym(0)=0).

Начальные условия: ∆ym(0)=0; Vym(0)=0

Решим систему дифф. уравнений

d/dt∆ym(t)= Vym(t)

d/dtVym(t)=(1/m)\*[Cd\*( Vys(t)- Vym(t))+Kpr\* (∆ys(t) – ∆ym(t))]

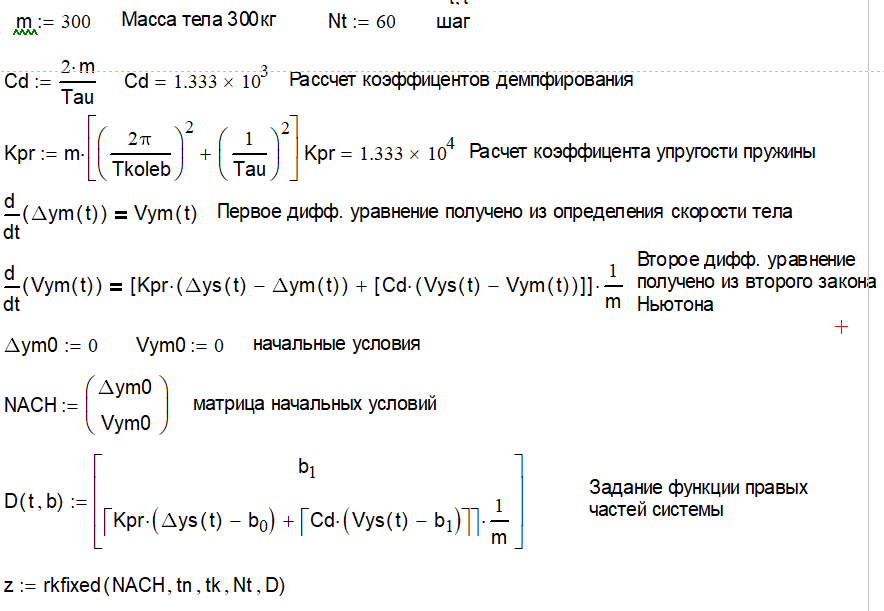
Подставив 1-е дифф. уравнение во 2-е и получим:

d/dtVym(t)=(1/m)\*[Cd\*( Vys(t) –d/dt∆ym(t))+Kpr\* (∆ys(t) – ∆ym(t))

следовательно

Vym(t)=∫0-2\*Ts (1/m)\*[Cd\*( Vys(t)–d/dt∆ym(t))+Kpr\* (∆ys(t)– ∆ym(t))dt

*из приложения MathCAD*



Результат решения системы двух дифференциальных уравнений:

*Таблица 7из приложения Excel*

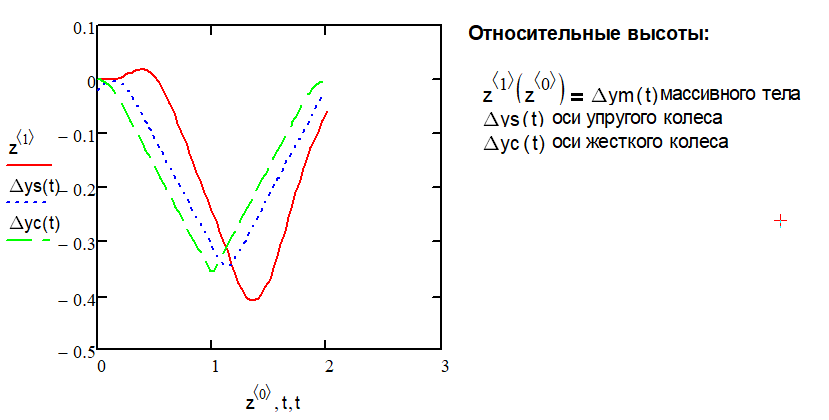
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **t** | **ym(t)** | **Vym(t)** | **№** | **t** | **ym(t)** | **Vym(t)** |
| **1** | 0 | 0 | 0 | **31** | 1 | -0,242 | -0,526 |
| **2** | 0,033333 | -3,46E-04 | -0,017 | **32** | 1,033333 | -0,26 | -0,552 |
| **3** | 0,066667 | -8,73E-04 | -0,012 | **33** | 1,066667 | -0,279 | -0,585 |
| **4** | 0,1 | -9,71E-04 | 7,89E-03 | **34** | 1,1 | -0,299 | -0,614 |
| **5** | 0,133333 | -2,52E-04 | 0,036 | **35** | 1,133333 | -0,32 | -0,628 |
| **6** | 0,166667 | 1,46E-03 | 0,066 | **36** | 1,166667 | -0,341 | -0,614 |
| **7** | 0,2 | 4,13E-03 | 0,093 | **37** | 1,2 | -0,36 | -0,565 |
| **8** | 0,233333 | 7,52E-03 | 0,109 | **38** | 1,233333 | -0,378 | -0,483 |
| **9** | 0,266667 | 0,011 | 0,111 | **39** | 1,266667 | -0,392 | -0,373 |
| **10** | 0,3 | 0,015 | 0,097 | **40** | 1,3 | -0,403 | -0,242 |
| **11** | 0,333333 | 0,018 | 0,066 | **41** | 1,333333 | -0,408 | -0,1 |
| **12** | 0,366667 | 0,019 | 0,02 | **42** | 1,366667 | -0,409 | 0,045 |
| **13** | 0,4 | 0,019 | -0,039 | **43** | 1,4 | -0,405 | 0,187 |
| **14** | 0,433333 | 0,016 | -0,106 | **44** | 1,433333 | -0,397 | 0,318 |
| **15** | 0,466667 | 0,012 | -0,178 | **45** | 1,466667 | -0,384 | 0,436 |
| **16** | 0,5 | 4,44E-03 | -0,249 | **46** | 1,5 | -0,368 | 0,535 |
| **17** | 0,533333 | -5,03E-03 | -0,318 | **47** | 1,533333 | -0,349 | 0,615 |
| **18** | 0,566667 | -0,017 | -0,381 | **48** | 1,566667 | -0,327 | 0,674 |
| **19** | 0,6 | -0,03 | -0,436 | **49** | 1,6 | -0,304 | 0,712 |
| **20** | 0,633333 | -0,046 | -0,482 | **50** | 1,633333 | -0,28 | 0,731 |
| **21** | 0,666667 | -0,062 | -0,518 | **51** | 1,666667 | -0,256 | 0,732 |
| **22** | 0,7 | -0,08 | -0,543 | **52** | 1,7 | -0,231 | 0,717 |
| **23** | 0,733333 | -0,098 | -0,559 | **53** | 1,733333 | -0,208 | 0,691 |
| **24** | 0,766667 | -0,117 | -0,565 | **54** | 1,766667 | -0,186 | 0,656 |
| **25** | 0,8 | -0,136 | -0,563 | **55** | 1,8 | -0,164 | 0,617 |
| **26** | 0,833333 | -0,155 | -0,553 | **56** | 1,833333 | -0,144 | 0,578 |
| **27** | 0,866667 | -0,173 | -0,54 | **57** | 1,866667 | -0,126 | 0,543 |
| **28** | 0,9 | -0,191 | -0,525 | **58** | 1,9 | -0,108 | 0,515 |
| **29** | 0,933333 | -0,208 | -0,514 | **59** | 1,933333 | -0,091 | 0,494 |
| **30** | 0,966667 | -0,225 | -0,514 | **60** | 1,966667 | -0,075 | 0,479 |
|  |  |  |  | **61** | 2 | -0,059 | 0,469 |

*Рис. 8. Относительные высоты:*

*(1) массивного тела Δym(t) [мм](красная линия)*

*(2) оси упругого колеса Δys(t) [мм] (синяя линия) (3) оси жесткого колеса Δyc(t) [мм] (зеленая линия)*

*из приложения MathCAD*



**Вывод.** Из этих графиков видим следующее:

1. Зависимость относительной высоты *Δym(t)* массивного тела имеет более плавный и более протяженный характер.
2. Амплитуда функции *Δym(t)* массивного тела также значительно превышает амплитуды функций *Δyc(t)* и *Δys(t).*
3. График *Δys (t)* очевидно более плавный,чем *Δyc(t),* что связано с плавным перетеканием вязкой жидкости

*из приложения Excel*

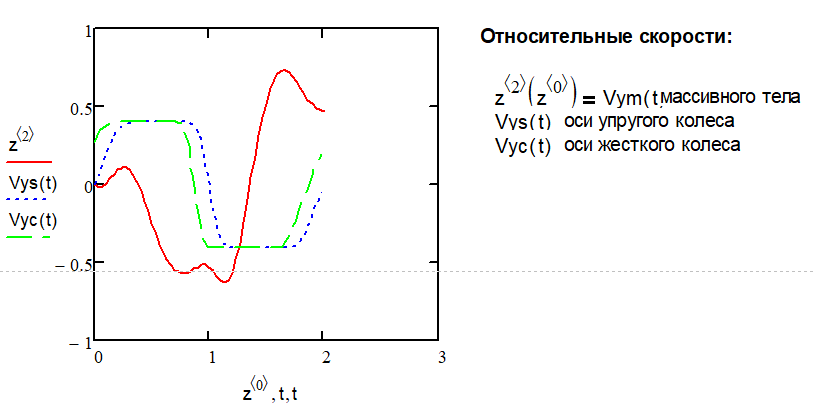
*Рис. 9. Относительные скорости:*

*1) массивного тела Vym(t) [мм](красная линия)*

*2) оси упругого колеса Vys(t) [мм] (синяя линия)*

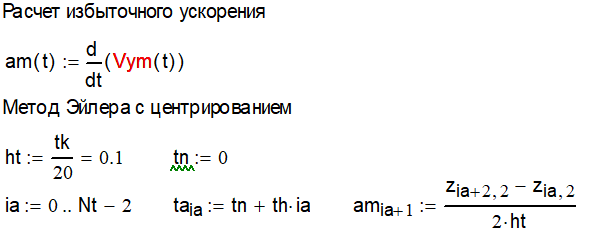
*3) оси жесткого колеса Vyc(t) [мм] (зеленая линия).*

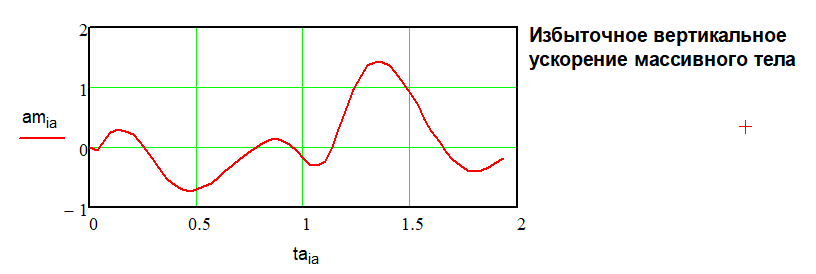
*из приложения MathCAD*



**Вывод**. Из этих графиков видим следующее. Зависимость *Vym(t)* вертикальной скорости массивного тела имеет более плавный и более протяженный характер, чем зависимость *Vys(t)* вертикальной скорости сглаженной высоты центра упругого колеса.

*из приложения MathCAD*





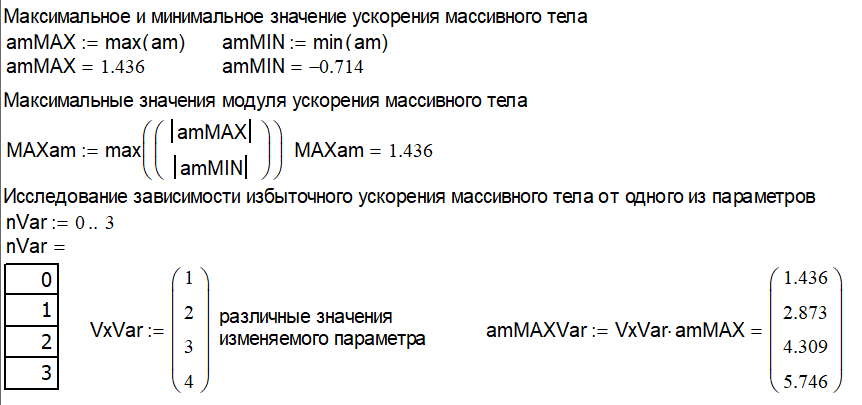
*Рис. 10. Избыточное вертикальное ускорение массивного тела*

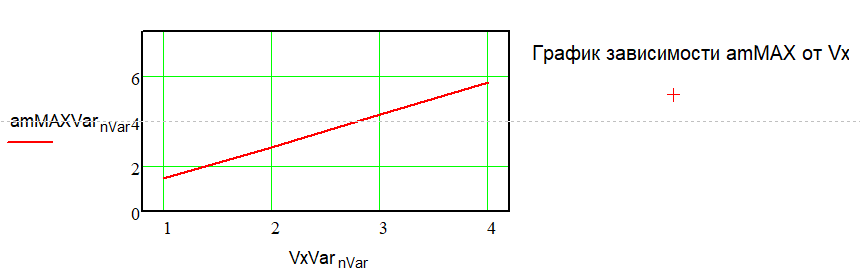
**Этап 3**

**Исследование зависимости избыточного ускорения**

**массивного тела от одного из параметров системы**

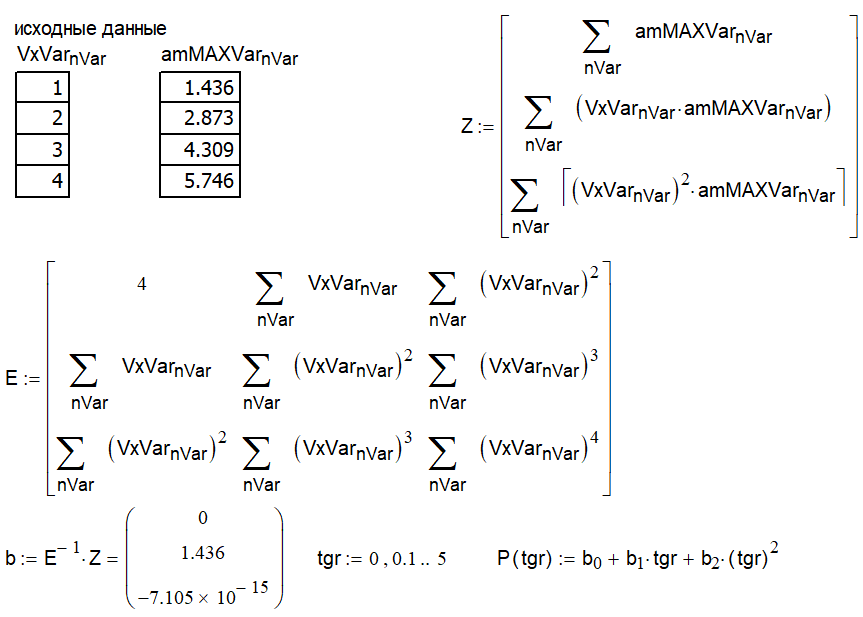
*из приложения MathCAD*

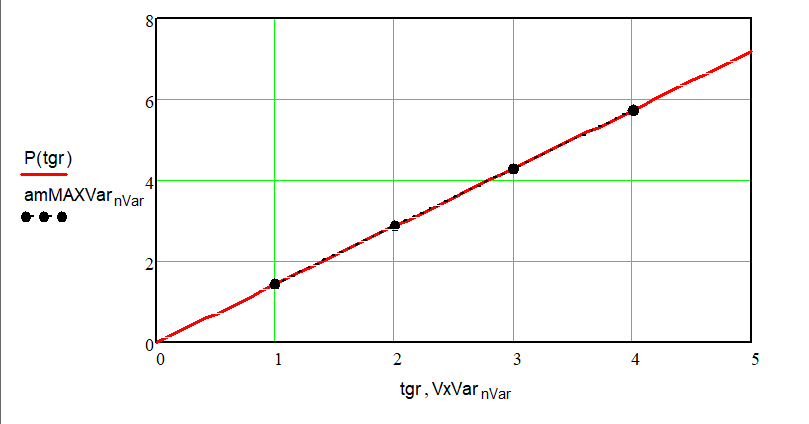




*Рис.11. График зависимости amMAX от Vx.*

**Аппроксимация функции полиномом второй степени**

**

**

*Рис.12. График зависимости amMAX от Vx и*

*кривая аппроксимирующего полинома.*

**Вывод**. Из графика видно, что амплитуда ускорения массивного тела зависит практически линейно от горизонтальной скорости колеса.

**Заключение**

Применение численных методов сводится к замене математических операций и отношений соответствующими операциями над числами, например, к замене интегралов суммами, бесконечных сумм – конечными и т.п. Результатом применения численных методов являются таблицы и графики зависимостей, раскрывающих свойства объекта. Численные методы являются продолжением аналитических методов в тех случаях, когда результат не может быть получен в явном виде. Численные методы по сравнению с аналитическими методами позволяют решать значительно более широкий круг задач.

Предложенные преподавателем программы показали себя эффективно для решения конкретных задач, под которые они были написаны. Но их использование для решения различных инженерных задач нецелесообразно из-за крайне ограниченного функционала. Возможный выход – это самостоятельное написание программ под конкретные задачи, но это чревато большими трудозатрами. Альтернатива – использование коммерческих пакетов (например, системы математического моделирования MathCAD, Excel и т.д.), позволяющих решать очень широкий круг задач.

С использованием этих программ, была создана корректная модель движения жёсткого колеса и установлено, что при преодолении препятствия происходит сглаживание острых углов препятствия. Применив параметр эффективного сглаживания упругого колеса установлено, что при спуске происходит запаздывания, а при подъёме опережение траектории жесткого колеса, кроме того еще сильнее проявляется эффект сглаживания острых углов препятствия.

Выяснено, что из-за значительной скорости колеса необходимо учитывать амортизацию.

Учитывая такие параметры как: масса тела, упругость пружины и коэффициент демпфирования стало ясно, что происходит сглаживание и растягивание траектории, увеличивается амплитуда колебаний.

Найдена линейная зависимость амплитуды ускорения массивного тела от горизонтальной скорости колеса.