



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
(БГТУ)

Политехнический колледж (ПК БГТУ)

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО БГТУ

_____ О.Н. Федонин

«30» 08 2020г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по учебной дисциплине
ЕН.02 «Компьютерное моделирование»

Специальность:	15.02.07	Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)
Уровень образования выпускника:	среднее профессиональное образование (СПО)	
Программа подготовки специалиста среднего звена (ППССЗ):	базовая	
Присваиваемая квалификация:	техник	
Форма обучения:	очная	
Срок получения СПО по ППССЗ:	3 года 10 месяцев	
Уровень образования, необходимый для приема на обучение по ППССЗ:	основное общее образование	
Год приема на обучение на 1-й курс:	2020	

Брянск 2020

Методические указания по выполнению лабораторных работ
по учебной дисциплине

ЕН.02 «Компьютерное моделирование»

(далее — МУ)

для специальности **15.02.07 Автоматизация технологических процессов и производств**
(по отраслям)

Разработал(и):

– преподаватель ПК БГТУ

О.А. Василенко

РП рассмотрена и одобрена на заседании предметно-цикловой
комиссии «Автоматизация технологических процессов и
производств» ПК БГТУ (далее — ПЦК)

от «30» 08 2020 г., протокол № 1

Председатель ПЦК

В. Н. Копелиович

Согласовано:

Заместитель директора ПК БГТУ
по учебно-методической работе

Т.Е. Балашова

© О.А. Василенко

© ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический
университет»

Содержание

- 1 Лабораторная работа №1 Моделирование физических явлений в системе Excel.
- 2 Лабораторная работа №2 Изучение команд системы Maple.
- 3 Лабораторная работа №3. Моделирование физических объектов в системе Maple.
- 4 Лабораторные работы №4-14 Изучение программирования в Mathcad.
- 5 Лабораторная работа №15 Моделирование одноконтурной системы автоматического регулирования в VISSIM
- 6 Лабораторная работа №16 3-D моделирование в КОМПАС

Лабораторная работа №1

Тема: «Моделирование физических явлений в системе Excel».

Электронные таблицы представляют собой класс специальных программ для ведения документации. Документ изображается на экране в виде таблицы, у которой именованы строки и столбцы. Каждая клетка может содержать текст, числа или формулу. С содержимым клеток можно производить арифметические, алгебраические и логические операции. Изменение содержимого одной из клеток автоматически ведет к изменению содержимого других клеток, связанных с ним логически или формулой. Таким образом, обработка данных происходит автоматически, результат получаем в виде готовых таблиц. При необходимости результат можно получить в виде графиков или же диаграмм.

Рассмотрим процесс математического моделирования физических задач с применением электронных таблиц Excel. Использовать систему Excel офисного приложения Windows имеет смысл, если у исследователя нет на компьютере какая-нибудь из систем компьютерной математики. С другой стороны, если студент научился согласно алгоритму вычислять значения неизвестных функций на первом шаге итерации, то он понимает работу алгоритма решения.

Технология решения (моделирования) физических объектов с помощью пакета Excel изложена также в работах [27, 48, 51].

В качестве примера возьмем классическую задачу: моделирование движения небесного тела под действием сил тяготения.

Задача 3. Построить орбиту малой планеты по ее координатам, рассчитанным с интервалом в 5 суток, если в перигелии она находится на расстоянии 0,5 а.е. от Солнца и имеет скорость 0,026 а.е./сут. Считать, что планета движется под действием притяжения только со стороны Солнца. Влияние других планет не учитывать.

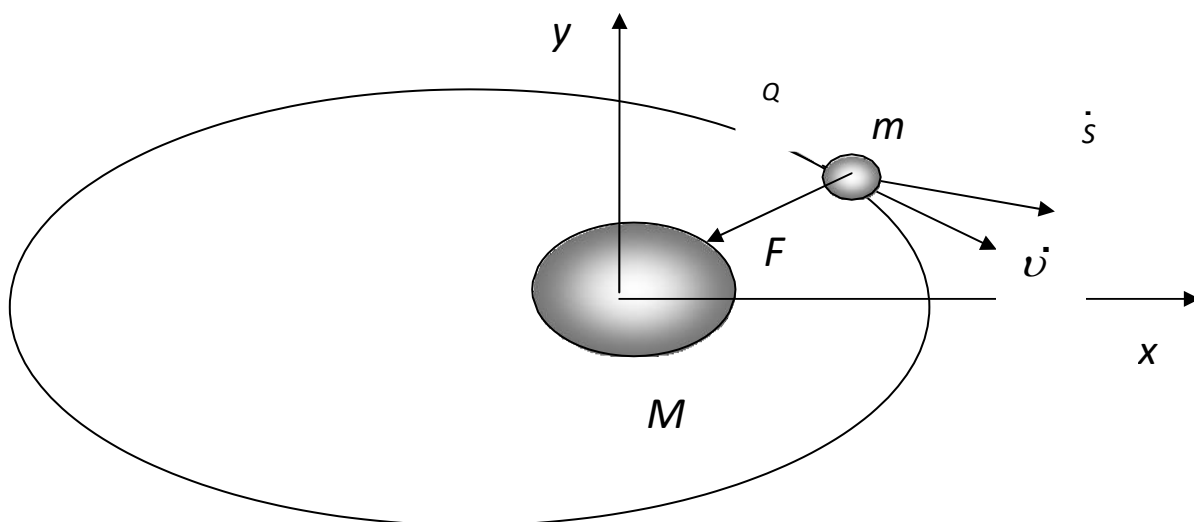


Рис. 3.2

Материальное тело (планета) массой m движется под действием притягивающего неподвижного центра (Солнца). Например, любое материальное тело движущееся под действием силы притяжения небесного тела (в частности, поля тяготения Солнца).

Дифференциальные уравнения движения могут быть получены из закона Ньютона

$$v_x(0) = 0, x(0) = x_0, v_y(0) = v_0, y(0) = 0,$$

предполагающими, что материальное тело в начальный момент времени лежит на оси

Ox в точке x_0 , не имеет соответствующей скорости вдоль оси Ox и имеет начальную скорость лишь вдоль оси Oy , которая равна y_0 .

Решение. Решение данной задачи средствами программирования приведены в [39, 42]. Ниже приведены формулы по методу Эйлера, позволяющие производить вычисления:

$$T_I = T_{I-1} + DT; R_I = \text{КОРЕНЬ}(X_I^2 + Y_I^2);$$

$$A_{I, X} = -GM * X_I / R_I^3;$$

$$A_{I, Y} = -GM * Y_I / R_I^3;$$

$$V_{I, X} = V_{I-1, X} - A_{I-1, X} * DT;$$

$$V_{I, Y} = V_{I-1, Y} - A_{I-1, Y} * DT; X_I = X_{I-1} +$$

$$V_{I-1, X} * DT; Y_I = Y_{I-1} + V_{I-1, Y} * DT;$$

Приведенные формулы представляют собой готовую схему алгоритма для вычислений.

Введем свою систему единиц. Время измеряется в сутках, расстояние в а.е. (астрономических единицах), за единицу массы принята масса Солнца. При таком выборе единиц числовые значения исходных данных таковы:

$$X_0 = 0,5; Y_0 = 0; V_{0,X} = 0; V_{0,Y} = 0,026; -GM = -1/58^2; DT = 5.$$

Заполняем электронную таблицу.

Первоначальный вид электронной таблицы приведен на рис.3.3. Пояснения к заполнению электронной таблицы

В ячейку A3 внесено 3.

В ячейку A4 введена формула =A3+3.

В ячейку B3 внесено 0.

В ячейку B4 введена формула =B3+5.

В ячейку C3 введена формула = (-1/(58^2))*G3/(I3^3), которая скопирована в ячейку C3.

В ячейку D3 введена формула = (-1/(58^2))*H3/(I3^3), которая скопирована в ячейку D3.

В ячейку E3 внесено значение начальной скорости по x равная 0.

В ячейку E4 введена формула =E3+C3*5.

В ячейку F3 внесено значение начальной скорости по y 0,026.

В ячейку F4 введена формула =F3+D3*5.

В ячейку G3 внесено начальная координата по x равная 0,5.

В ячейку G4 введена формула =G3+E4*5.

В ячейку H3 внесено начальная координата по y равная 0.

В ячейку H4 введена формула =H3+F4*5.

В ячейку I3 введена формула =КОРЕНЬ(G3^2+H3^2), которая скопирована в ячейку I3.

В ячейку J3 введена формула =КОРЕНЬ(C3^2+D3^2), которая скопирована в ячейку J3.

Таким образом, мы заполнили две строки. В третьей строке введены начальные значения, в строке №4 формулы расчета. Выделяя строку №4 и растягивая мышью по вертикали, получаем расчетные значения на каждый момент времени.

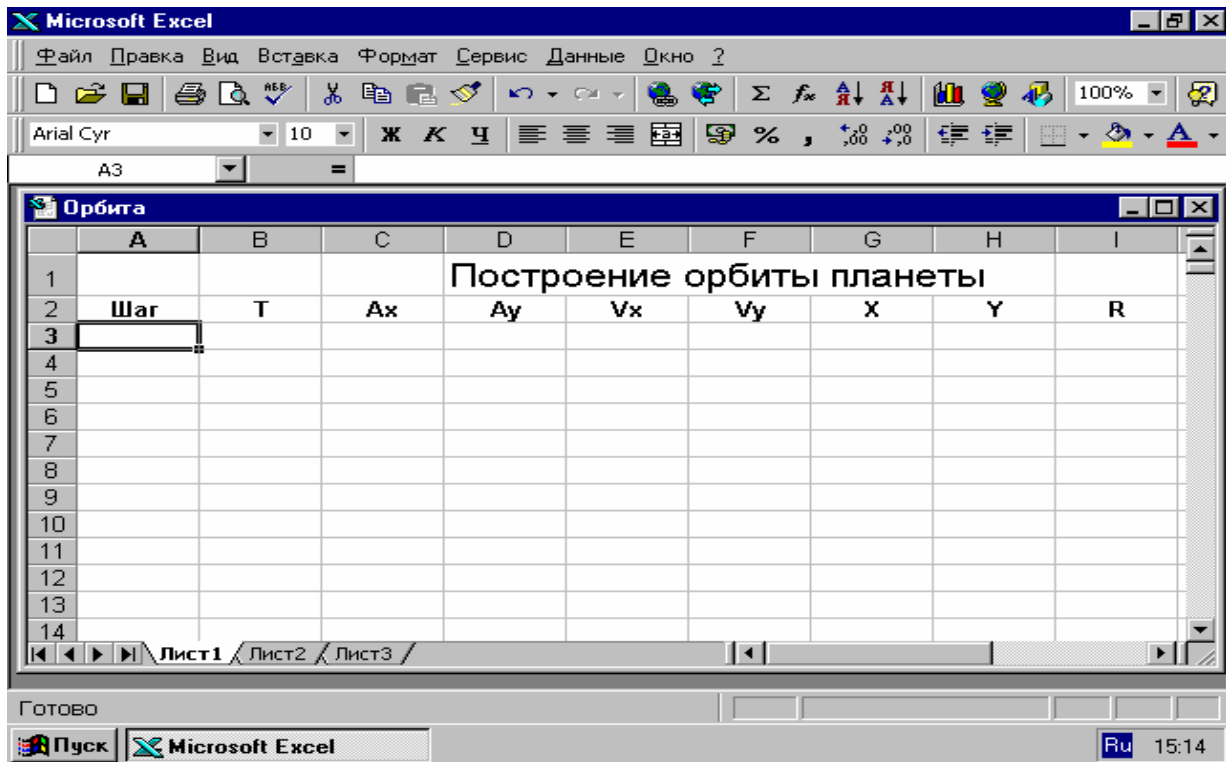


Рис. 3.3

Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

		C	D	E	F	G	H	I	K
	аг	Ax	Ay	Vx	Vy	X	Y	R	A
		-	0	0	0,026	0,5	0	0,5	0,001
		0,00119							189
		-	-	-	0,026	0,470	0,13	0,4879	0,001
		0,0012	0,00033	0,00595		273		11	249
		-	-	-	0,024	0,410	0,251	0,4814	0,001
	0	0,00109	0,00067	0,01196	336	458	682	76	282
		-	-	-	0,020	0,323	0,356	0,4813	0,001
	5	0,00086	0,00095	0,01743	985	313	607	52	283
		-	-	-	0,016	0,214	0,437	0,4875	0,001

		0	0,00055	0,00112	0,02174	232	624	769	5	251
		5	-	-	-	0,010	0,092	0,490	0,4994	0,001
			0,00022	0,00117	0,02449	618	172	86	39	192
		0	7,75E-05	-	-	0,004	-	0,514	0,5159	0,001
				0,00111	0,02559	762	0,03578	669	11	117
0		5	0,000	-	-	-	-	0,510	0,5356	0,001
			313	0,00099	0,0252	0,00081	0,16179	624	43	036
			-	-	-	-	-	-	-	-
17	5	0	0,000	-	-	-	-	0,012	0,6766	0,000
			649	1,2E-05	0,00488	0,01913	0,67652	422	39	649
8	6	5	0,000	7,56E-05	-	-	-	-	0,6897	0,000
			62		0,00163	0,01919	0,68467	0,08351	45	625
9	7	0	0,000	0,000	0,001	-	-	-	0,7001	0,000
			587	154	472	0,01881	0,67731	0,17755	96	606
0	8	5	0,000	0,000	0,004	-	-	-	0,7078	0,000
			549	224	404	0,01804	0,65529	0,26774	77	593

Для построения орбиты планеты выделяем ячейки G2:H20. Из мастера диаграмм выбираем тип диаграммы “Точечная”, далее “Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями без маркеров”. В заголовке указываем название графика “Траектория орбиты”. Полученная траектория орбиты приведена на рис.3.3.

Чтобы получить график удаления планеты в различные моменты итерации, выделяем ячейки I2:I20. Из мастера диаграмм выбираем тип диаграммы “Лепестковая”, далее “Лепестковая диаграмма является аналогом графика в полярной системе координат ...”. В заголовке указываем название диаграммы “Удаление планеты от Солнца”. Полученный график приведен на рис.3.6.

Для построения графика зависимости ускорения от времени выделяем ячейки C2:D20. Из мастера диаграмм выбираем тип диаграмм “График”, далее “График отображает развитие процесса во времени или по категориям”. Выбираем “далее”, выпадает меню “диапазон данных”. В меню “диапазон данных” выбираем “ряд”. В “подписи оси X” набираем =Лист1!\$B\$2:\$B\$20. Указатель мыши подводим к “добавить” и щелкаем левой кнопкой мыши, в “имя” набираем – A, в “значения” набираем =Лист1!\$I\$2:\$I\$20. Указатель мыши подводим к “далее” и щелкаем левой кнопкой мыши. В подписи данных вводим название диаграммы “График зависимости ускорения от времени”. Указатель мыши подводим к “готово”, щелкаем левой кнопкой мыши. График готов. Рис. 3.3. Увеличение количества шагов итерации дает более полное решение задачи.



Рис. 3.4

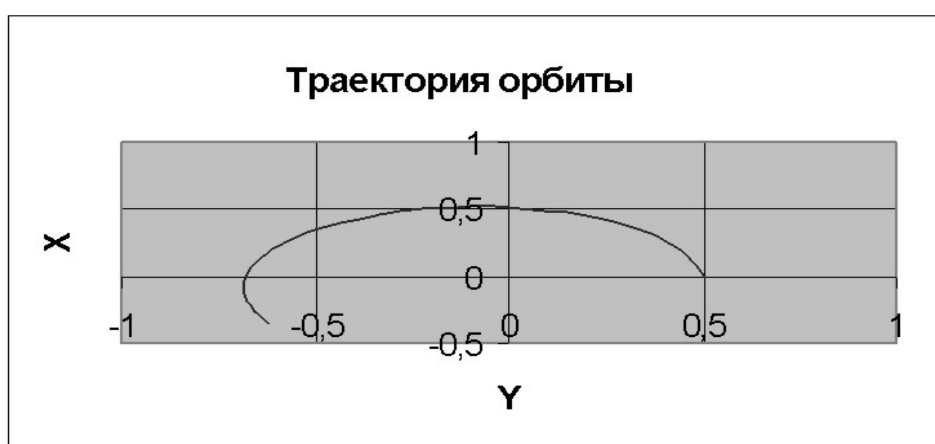


Рис. 3.5



Рис. 3.6

Использование электронных таблиц при моделировании физических процессов не единственная область. Применение электронных таблиц при проведении расчетов данных лабораторных работ позволяет сделать основной упор на постановку опыта (эксперимента) и анализ полученных результатов, т.е. формированию навыков, необходимых физику-экспериментатору.

В качестве примера приведем решение задачи «Движение тела в поле силы тяжести Земли».

Задача 3. Свинцовый шарик массой $m = 0,54$ г падает в масле (плотность свинца $\rho_c = 11,3 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность масла $\rho_m = 0,92 \cdot 10^3$ кг/м³, вязкость масла $\mu_m = 0,95$ кг/(мс)) с начальной скоростью U_0 , направленной по вертикали. Постройте графики скорости, ускорения и перемещения шарика от времени. Варьируя U_0 , установите с помощью компьютерной модели характерные особенности движения шарика.

Математическая модель. Будем считать, что на движущийся шарик в газовой или жидкой среде действуют сила трения, тяжести и архимедова сила. Величина силы сопротивления среды при малых скоростях пропорциональна скорости и имеет вид

$$F_{\text{сопр}} = k_1 v, \quad (3.2)$$

Для шарика $k_1 = 6\pi\mu r$, где μ - динамическая вязкость среды, r - радиус шарика. Сила Архимеда $F_a = \rho_{cp} V g = \rho_{cp} \pi r^3 g / 3$

Закон Ньютона в направлении движения шарика имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = mg - F_c - F_a$$

с учетом (3.2) и силы Архимеда получим уравнения движения шарика в вязкой среде

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{k_1 v}{m} - \frac{\rho_{cp} V g}{m}, \quad \frac{dy}{dt} = v \quad (3.3)$$

Эти уравнения и составляют математическую модель движения тела в вязкой среде.

Решение. Введем обозначения и присвоим им значения и вычислим некоторые вспомогательные величины.

Обозначение величин и присваивание им значений

N	A	C	D	E	F	G	
1	$\rho_c =$	11,13E+04	кг/м ³	μ Дин	0,95	кг/(мс)	5,40E-04 кг
2	$\rho_m =$	9,50E+02	кг/м ³	$V_0 =$	-0,5	м/с	
3	$g =$	9,81	м/с ²	$Dt =$	0,001	с	

Вычисление радиуса шарика, коэффициента сопротивления $k_1 = 6\pi\mu r$, объема шарика $V_{\text{шар}} = m/\rho_c$ проведены в ячейках B4, B5 и E4

4	$r =$	0,00225117	м	$V_{\text{шар}} =$	4,778E-08	м ³
5	$k =$	0,04031193	кг/с			

Заполним шестую строку таблицы данных начальными данными. В седьмой строке получим первые значения скорости и ускорения. Остальные значения получаем, растягивая мышью, выделенную седьмую строку первых значений данных по вертикали.

ТАБЛИЦА ДАННЫХ

	dt, c	V, м/с	dV, м/с	y, м	dy, м/с	a, м/с^2
	0	-0,5	0,047052	0	-0,0005	4,63E+01
	0,001	-0,45295	0,043539	-0,0005	-0,00045	4,28E+01
	0,002	-0,40941	0,040289	-	-0,00041	3,95E+01
	0,003	-0,36912	0,037281	0,000952948	-0,00037	3,65E+01
	---	---	---	---	---	---
7	0,047	0,113845	0,001227	-	0,000114	4,87E-01
8	0,048	0,115072	0,001136	0,001985586	0,000115	3,95E-01
9	0,049	0,116208	0,001051	-	0,000116	3,10E-01
0	0,05	0,117258	0,000972	0,001870514	0,000117	2,32E-01
				-		
				0,001754306		

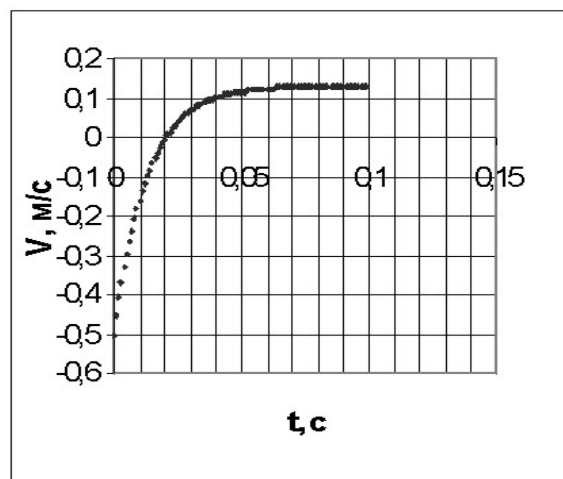
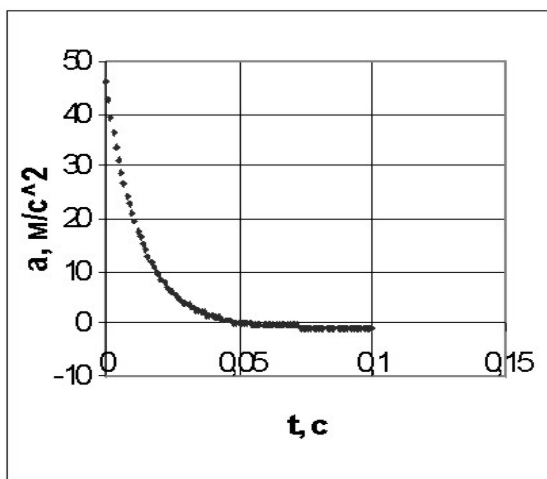


Рис. 3.7. Графики зависимости ускорения и скорости от времени

Задача 3. Движение заряженной частицы с зарядом q и массой m в кулоновском поле другой частицы с зарядом Q , положение которой зафиксировано. Математическую модель можно получить на основе закона Ньютона

$$F = m \frac{dV}{dt} \quad (3.4)$$

и закона Кулона.

$$F = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^3} \dot{r} \quad (3.5)$$

В системе координат, начало которой привязано к телу с большой массой и зарядом Q , уравнения модели имеют вид:

$$\begin{aligned} dV_x / dt &= - Qq x / (x^2 + y^2)^{3/2} \\ dx/dt &= V_x \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$dV_y / dt = - Qq y / (x^2 + y^2)^{3/2}$$

$$dy/dt = V_y$$

Начальные условия определяются двумя параметрами: начальной скоростью и углом α .

$$x(0) = x_0, \quad y(0) = 0, \quad (3.7)$$

$$v_{x0} = v_0 \cos \alpha, \quad v_{y0} = v_0 \sin \alpha,$$

Решение. Задачу решим методом Эйлера. Формулы по которым проводятся вычисления имеют вид

$$T_I = T_{I-1} + H;$$

$$X_I = X_{I-1} + H * V_{I-1, X}; \quad Y_I = Y_{I-1} +$$

$$H * V_{I-1, Y};$$

$$R_I = \text{КОРЕНЬ}(X_I^2 + Y_I^2).$$

$$A_{I, X} = -q * Q * X_I / R_I^3; \quad A_{I, Y} = -$$

$$q * Q * Y_I / R_I^3; \quad V_{I, X} = V_{I-1, X} - A_{I-1, X} * H;$$

$$V_{I, Y} = V_{I-1, Y} - A_{I-1, Y} * H;$$

$$V_{I, Y} = V_{I-1, Y} - A_{I-1, Y} * H;$$

Введем обозначения и присвоим им значения и вычислим некоторые вспомогательные величины.

2. В ячейке C1 задано значение первоначального угла =B2*3,14/180

3. В ячейках B2-B6 заданы входные параметры

3. В ячейке A11 задано начальное значение координаты X

3. В ячейке B11 задано начальное значение координаты Y

5. В ячейке C11 вычислено =B3*COS(C2)

6. В ячейке D11 вычислено =B3*SIN(C2)

Вычисления производятся в строке №12 по формулам

7. В ячейке A12 по формуле =A11+C11*B\$7

8. В ячейке B12 по формуле =B11+D11*B\$7

9. В ячейке C12 по формуле

$$=C11+(A11*B\$4*B\$5*B\$7)/(B\$6*\text{КОРЕНЬ}((A11^2+B11^2))^{^3})$$

10. В ячейке D12 по формуле

$$=D11+(B11*B\$4*B\$5*B\$7)/(B\$6*\text{КОРЕНЬ}((A11^2+B11^2))^{^3})$$

Остальные значения координат и скоростей получаем, растягивая мышью выделенную строку №12 значений данных по вертикали.

	A	B	C	D
1	Угол	1	0,017444	
2	скорость	10		
3	заряд 1	79		
4	заряд 2	2		
5	масса	4		
6	шаг	0,001		
7				
8				
9				
10	x(i)	y(i)	vx(i)	vy(i)
11	-1	0	0,999848	0,017444
12	-0,9995	8,72E-06	0,980098	0,017444
13	-0,99901	1,74E-05	0,960328	0,017444
14	-0,99853	2,62E-05	0,940539	0,017444
15	-0,99806	3,49E-05	0,920731	0,017445
16	-0,9976	4,36E-05	0,900904	0,017445

17	-0,99715	5,23E-05	0,881059	0,017446
18	-0,99671	6,11E-05	0,861196	0,017447
19	-0,99628	6,98E-05	0,841315	0,017448

Для построения траектории движения выделяем ячейки A11:A50. Из мастера диаграмм выбираем тип диаграммы “Точечная”, далее “Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями без маркеров”. Полученная траектория движения заряженной частицы в кулоновском поле ядра приведена на рис.

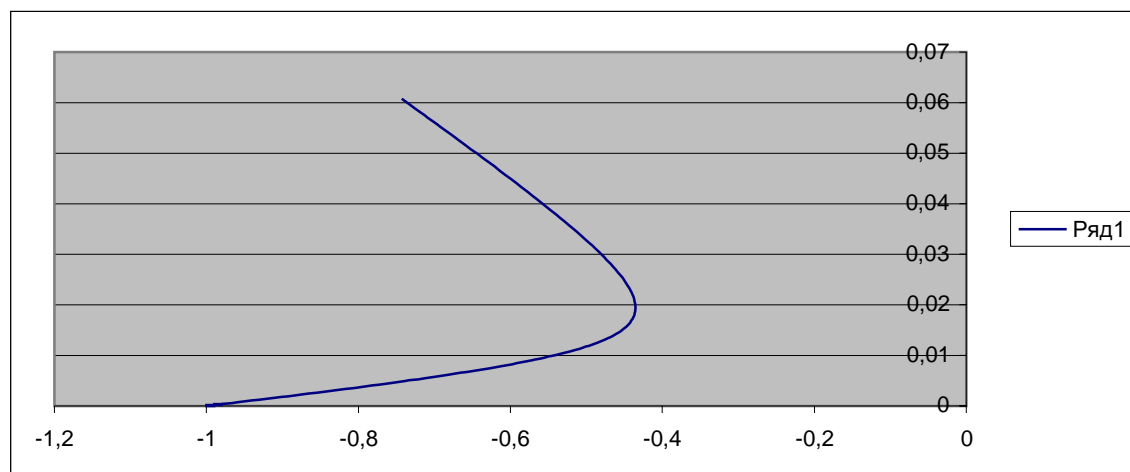


Рис.3.8.

Лабораторная работа №2

Тема: «Изучение команд системы Maple».

На персональном компьютере сегодня можно решать задачи научно-технического характера, не прибегая к их кодированию на каком-нибудь алгоритмическом языке (Бейсик, Паскаль, СИ). Использование интегрированных программных систем автоматизации математических расчетов (Eureka, Maple, Mathematica, MatLab, MathCAD и др.) позволяют решать поставленные задачи на входном языке, который максимально приближен к естественному математическому языку.

С каждой новой версией Maple добавляются новые математические пакеты расширения и применения для решения задач. По изучению приемам работы и методики решения физических задач в системе Maple мы отсылаем к книгам [15, 19].

Знакомство с системой Maple. Интерфейс данной системы адаптирован для работы пользователя, имеющего элементарные навыки работы с Windows-приложениями.

Под интерфейсом понимается не только легкое управление системой, как с клавишного пульта, так и с помощью мыши, но и просто набор необходимых символов, формул, текстовых комментариев с последующим запуском документов (Worksheets) в реальном времени.

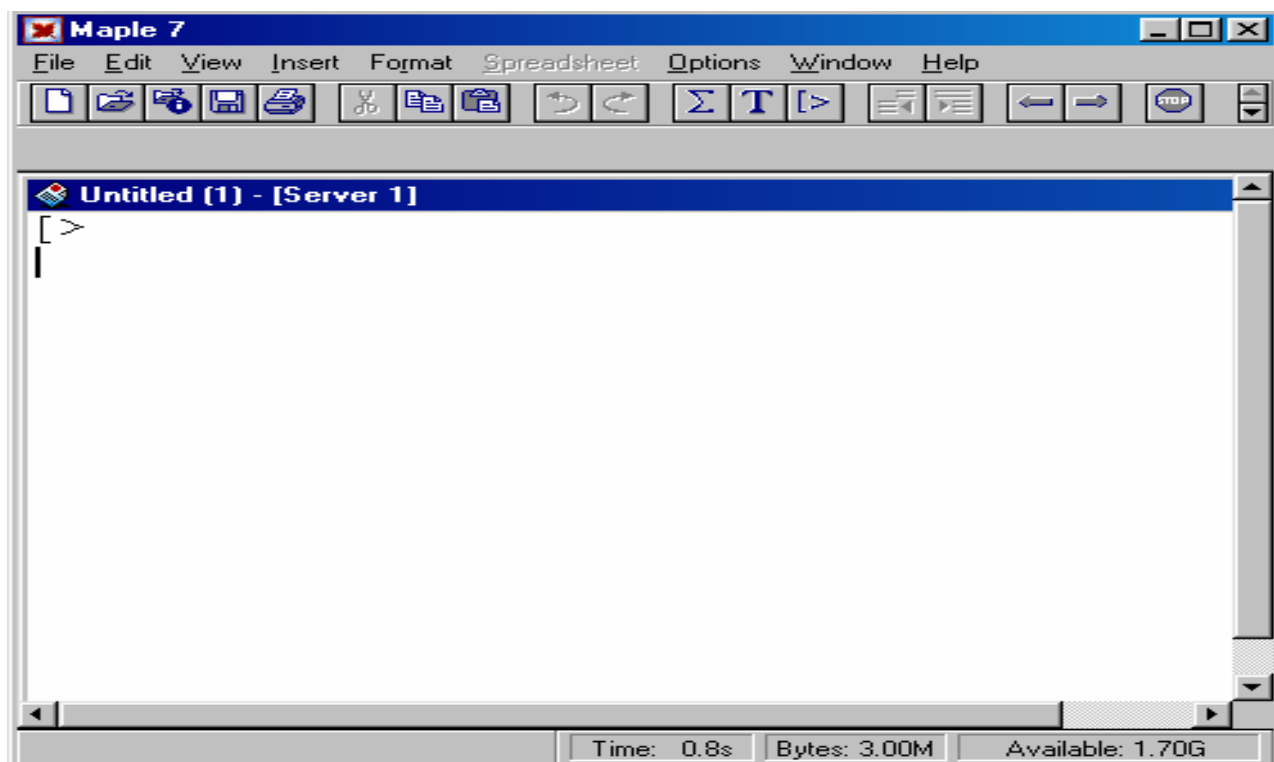


Рис.3.9

Запустив систему Maple из Windows, вы увидите на экране окно (рис. 3.11). Над ним видна строка с основными элементами интерфейса. Опции главного меню, содержащиеся в этой строке, легко изучить самостоятельно через опцию Help; некоторые из них очень похожи на стандартные опции, принятые в текстовых редакторах Windows.

Остановимся на применении системы Maple для решения дифференциальных уравнений. Для решения простых обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и систем (ОДУ) используется процедура пакета Maple *dsolve*, которая в общем виде записывается как:

dsolve ({ ODE, nach }, { funcs }, type solution).

Здесь ODE – идентификатор, которому присваивается дифференциальное уравнение (система ОДУ) или само ДУ;

nach – начальные условия;

funcs – определяемые функции;

type solution – опция, задающая метод аналитического или численного решения. Этот параметр определяет тип используемого метода аналитического или численного решения ОДУ. При задании этого параметра в виде:

explicit – выдает явное решение;

formal series – решение в форме степенного многочлена;

series – решение в виде ряда с порядком, которое указывается впереди функции *dsolve* в виде *Order:=8*;

integral transform – решение на основе интегральных преобразований Лапласа, Фурье и др.;

numeric – решение в численном виде.

Если мы не указываем этот параметр, то система сама выбирает предпочтительный метод решения по умолчанию.

Рассмотрим в краткой форме процесс решения дифференциальных уравнений и моделирования физических задач в системе Maple [12, 28] на примере уравнения

$$\frac{dy}{dx} = -ay. \quad (3.8)$$

Среда допускает произвольную запись нахождения решения. Она может быть оформлена через операторы присвоения, например

```
ODE:=diff(y(x),x)=-a*y(x)
Nach:=y(0)=5;
dsolve({ODE,Nach},y(x));
```

 (3.9)

или уравнения, начальные значения, определяемые функции, используемый метод решения записываются в одной строке, например

```
dsolve({diff(y(x),x)=-a*y(x),y(0)=5},y(x));
```

 (3.10)

возможна также их комбинация. Полученное решение может быть присвоено какому-либо оператору

```
F:=dsolve({diff(y(x),x)=-a*y(x),y(0)=5},y(x));
```

Построение графика может быть проведена с помощью опции в виде

```
with(plots);
odeplot(F,[x,y(x)],0..200);
```

или использовать равнозначную запись

```
plots[odeplot](F,[x,y(x)],0..200);
```

Решение дифференциальных уравнений второго и более высоких порядков может быть описано с помощью функции `diff`, но в производной по аргументу ставится знак `$` и порядок производной. Например

```
dsolve({diff(y(x),x$2)=-a*sin(x),y(0)=5,y(1)=0},y(x));
```

 (3.10)

Решение систем дифференциальных уравнений может быть проведено различными методами выбором параметра *type solution* [15,19], в явном виде, в виде разложения в ряд или иного вида. Чаще всего для начальных оценок используется различные численные методы.

Если мы в опции `dsolve` после типа решения *numeric* указываем `method=classical`, то система Maple выдаст решение с помощью одного из восьми версий классического метода. В системе Maple имеются и другие методы решения:

rkf45 - метод Рунге – Кутты –Фейхсберга 4-5 порядка

dverk78 - метод Рунге – Кутты 7-8 порядка

gear - одношаговый метод Гира

lsode - одна из версий Ливенморского решателя дифференциальных уравнений

taylorseries – метод разложения в ряд Тейлора.

Лабораторная работа №3

Тема: «Моделирование физических объектов в системе Maple.»

Пример 1. Движение небесного тела в гравитационном поле описывается системой уравнений

$$\begin{aligned}\frac{d v_x}{dt} &= -GM \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}}, \\ \frac{d v_y}{dt} &= -GM \frac{y}{(x^2 + y^2)^{3/2}}, \\ \frac{dx}{dt} &= v_x, \quad \frac{dy}{dt} = v_y.\end{aligned}\tag{3.11}$$

с начальными условиями определенными двумя параметрами: начальной скоростью и углом α .

$$\begin{aligned}x(0) &= x_0, \quad y(0) = 0, \\ v_{x0} &= v_0 \cos \alpha, \quad v_{y0} = v_0 \sin \alpha.\end{aligned}\tag{3.12}$$

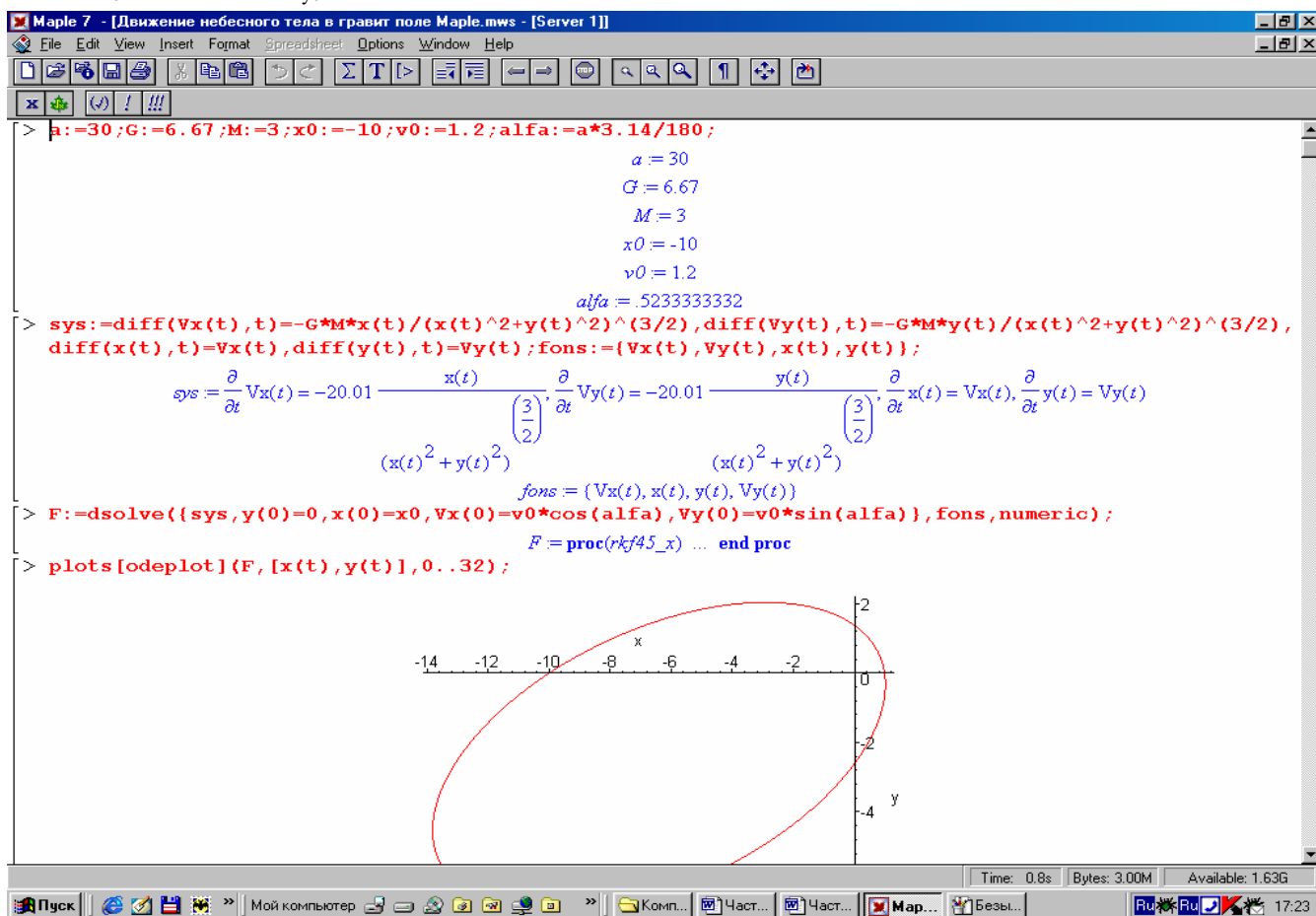


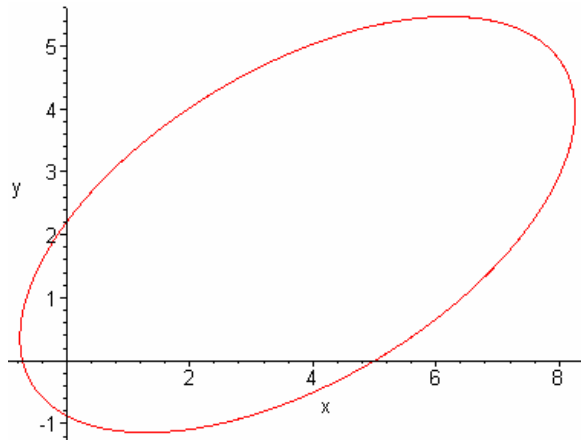
Рис.3.10

Листинг программы в Maple приведен на рис.3.10. Ниже проведено исследование движения небесного тела в зависимости от начальной скорости v_0 .

```

v0:=2;sys:=diff(Vx(t),t)=-G*M*x(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2), diff(Vy(t),t)=-
G*M*y(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2), diff(x(t),t)=Vx(t), diff(y(t),t)=Vy(t):
fons:={Vx(t),Vy(t),x(t),y(t)}:
F:=dsolve({sys,y(0)=0,x(0)=5,Vx(0)=v0*cos(alfa),
Vy(0)=v0*sin(alfa)},fons,numeric):
plots[odeplot](F,[x(t),y(t)],0..200);
v0:=2

```

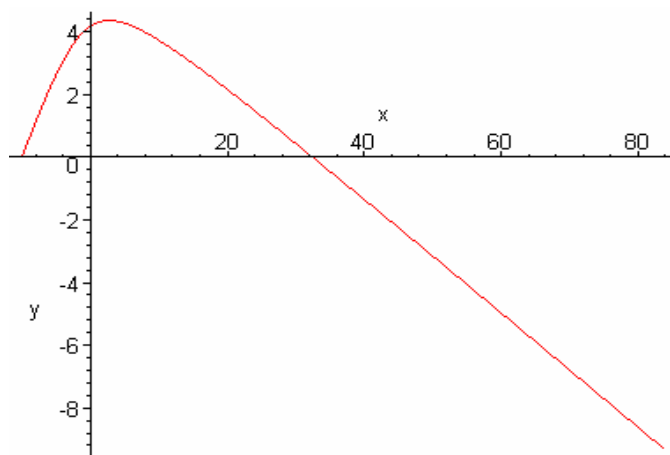


```

v0:=3.5;sys:=diff(Vx(t),t)=-G*M*x(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2), diff(Vy(t),t)=-
G*M*y(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2), diff(x(t),t)=Vx(t), diff(y(t),t)=Vy(t):
fons:={Vx(t),Vy(t),x(t),y(t)}:
F:=dsolve({sys,y(0)=0,x(0)=x0,Vx(0)=v0*cos(alfa),
Vy(0)=v0*sin(alfa)},fons,numeric):
plots[odeplot](F,[x(t),y(t)],0..30);

```

v0 := 3.5

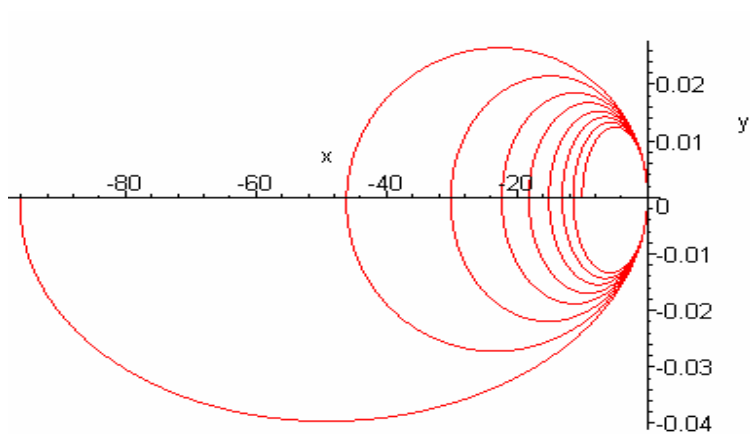


```

v0:=0.005;sys:=diff(Vx(t),t)=-G*M*x(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2),
diff(Vy(t),t)=-G*M*y(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2),
diff(x(t),t)=Vx(t),diff(y(t),t)=Vy(t): fons:={Vx(t),Vy(t),x(t),y(t)}:
F:=dsolve({sys,y(0)=0,x(0)=x0,Vx(0)=v0*cos(alfa),
Vy(0)=v0*sin(alfa)},fons,numeric): plots[odeplot](F,[x(t),y(t)],0..650);

```

v0 := .005



Пример 2. Движение заряженного тела в кулоновском поле ядра .
Рассмотрим технологию решения задачи (3.6) движения заряженной частицы в кулоновском поле ядра в системе MAPLE

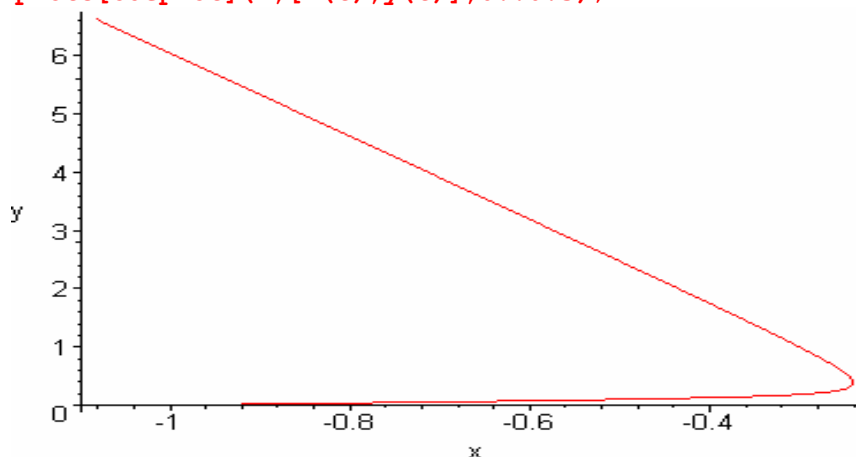
```
> Q:=79;q:=2;m:=4;v0:=14;a:=10/180*3.14;
Q := 79
q := 2
m := 4
v0 := 14
a := .1744444444
> yz0:=y(0)=0,x(0)=-1,vx(0)=v0*cos(a),vy(0)=v0*sin(a);

yz0 := y(0) = 0, x(0) = -1, vx(0) = 13.78752359, vy(0) = 2.429854566
> sys:=diff(vx(t),t)=Q*(q/m)*x(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2),
diff(x(t),t)=vx(t),diff(vy(t),t)=(Q/m)*q*y(t)/(x(t)^2+y(t)^2)^(3/2),
diff(y(t),t)=vy(t),funcs:={x(t),vx(t),y(t),vy(t)};
sys:=

$$\frac{\partial}{\partial t} vx(t) = -\frac{79}{2} \frac{x(t)}{(x(t)^2 + y(t)^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial}{\partial t} x(t) = vx(t), \quad \frac{\partial}{\partial t} vy(t) = \frac{79}{2} \frac{y(t)}{(x(t)^2 + y(t)^2)^{3/2}},$$


$$\frac{\partial}{\partial t} y(t) = vy(t)$$

fons := { vx(t), x(t), y(t), vy(t) }
F:=dsolve({sys,yz0},funcs,numeric);
F := proc (rkf45_x) ... end proc
> plots[odeplot](F,[x(t),y(t)],0..0.5);
```



Пример 3. Двойной маятник

Процесс колебания двойного маятника (на математическом маятнике с одной массой, подвешен другой с меньшей массой) описывается системой дифференциальных уравнений

$$\ddot{X} = -\omega^2 (1 + 2\mu) X + \mu\omega^2 x, \quad \dot{X}(0) = 0, \quad X(0) = X_0, \quad (3.13)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 x + \omega^2 X, \dot{x}(0) = (0) = 0$$

где X и x - отклонения тяжелого и легкого маятников от положения

равновесия, $\mu = \frac{m}{M}$ - малое число, а m и M - массы легкого и тяжелого

маятников, $\omega^2 = \frac{g}{l}$, g – ускорение свободного падения, l - длина легкого

маятника. Предполагается, что приведенные длины маятников равны, т.е. $L=l$.

Решение

```
> m1:=1; m2:=0.001; mu:=m2/m1; g:=9.8; l:=1; omega2:=g/l;
```

$$ml := 1$$
$$m2 := .001$$
$$\mu := .001$$
 $g := 9.8$
$$l := 1$$
$$\omega_2 := 9.8$$

```
x0:=1; apply(x1,t); apply(x2,t);
```

```
apply(diff(x1(t),t),t); apply(diff(x1(t),t),t);
```

$$x0 := 1$$
$$\mathbf{x}_1(t)$$
 $x_2(t)$
$$\underline{\psi}^T \mathbf{x}_1(t) - \underline{\psi}^T(t)$$
$$\frac{\partial t_a}{\partial t_b} = \frac{\partial t_a}{\partial t_c} \frac{\partial t_c}{\partial t_b}$$
$$\frac{\partial}{\partial t} x_1(t) = x_2(t)$$
 ∂t

```
sys:=diff(x1(t),t$2)=-omega2*(1+2*mu)*x1(t)+mu*omega2*x2(t),
```

```
diff(x2(t),t$2)=-omega2*x2(t)+omega2*x1(t);
```

$$\text{sys} := \frac{\partial^2}{\partial t^2} x1(t) = -9.8196 x1(t) + .0098 x2(t), \frac{\partial^2}{\partial t^2} x2(t) = -9.8 x2(t) + 9.8 x1(t)$$

```
> nach:=x1(0)=x0,x2(0)=x0,D(x1)(0)=0,D(x2)(0)=0;
```

$$nach := x1(0) = 1, x2(0) = 1, D(x1)(0) = 0, D(x2)(0) = 0$$

```
> fun:={x1(t),x2(t)};
```

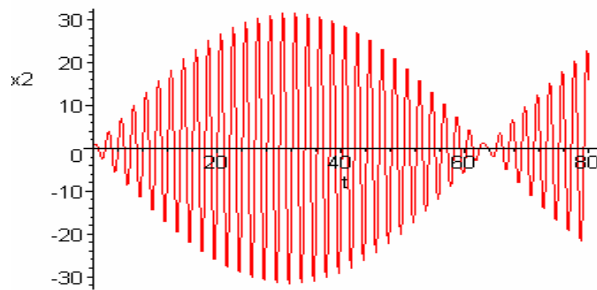
$$fun := \{ x1(t), x2(t) \}$$

```
> F:=dsolve({sys,nach},fun,numeric);
```

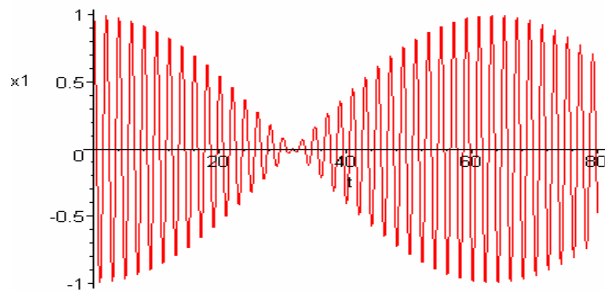
```
F := proc (rkf45_x) ... end proc
```

```
> with (plots) :
```

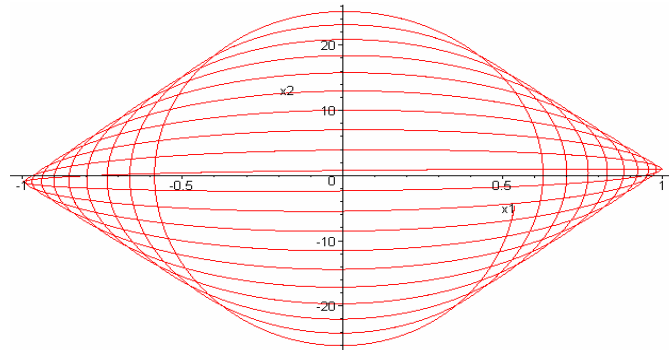
```
> odeplot(F, [t, x2(t)], 0..80, numpoints=25);
```



```
> odeplot(F, [t, x1(t)], 0..80, numpoints=25);
```



```
> odeplot(F, [x1(t), x2(t)], -20..20);
```



Пример 4. Выпрямление переменного напряжения с фильтрацией
описывается математической моделью

$$-\frac{du(t)}{dt} = \frac{1}{rC} E(t) - \frac{1}{R} + \frac{r}{R} u(t) \quad (3.14)$$

$$u(0) = 0.$$

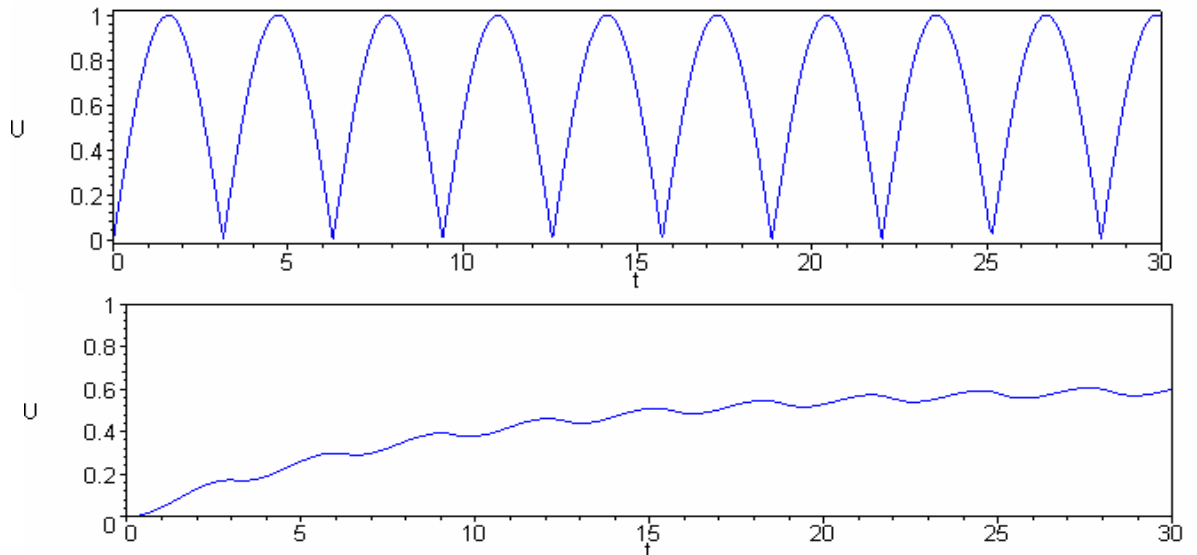
Здесь C – емкость конденсатора фильтра, r – сопротивление схемы фильтра, R_n – сопротивление нагрузки, $E(t)$ – вид выпрямленного напряжения после одно или двух полупериодного выпрямления.

```
> r:=1;R:=40;C:=0.1;
r:=1
R:=40
C:=.1
> E(t):=abs(sin(t));
E(t):=|sin(t)|
pr:=diff(u(t),t)=1/r*C*(E(t)-(1+r/R)*u(t));fons:=u(t);
F:=dsolve({pr,u(0)=0},fons,type=numeric,output=listprocedure);
pr:=∂u(t)/∂t=.1|sin(t)|-.1025000000u(t)
```

```

fons := u( t )
F := [ t = ( proc ( t ) ... end proc ), u( t ) = ( proc ( t ) ... end proc ) ]
> Y:=subs (F,u (t)) ;
Y:= proc ( t ) ... end proc
> plot(E(t), t=0..30,color=blue,labels=[t,U]) ;
plot(Y,0..30,0..1,color=blue,labels=[t,U]) ;

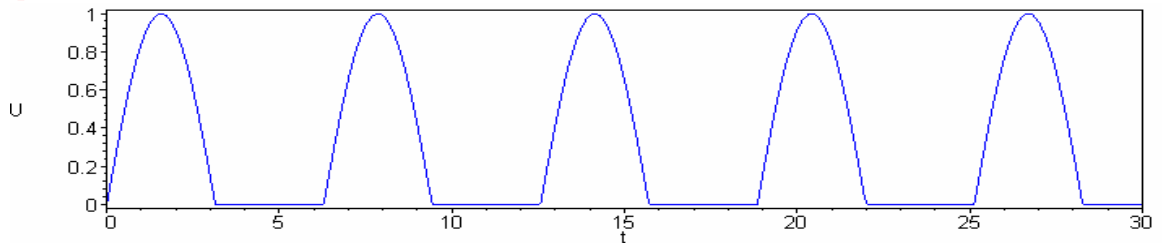
```

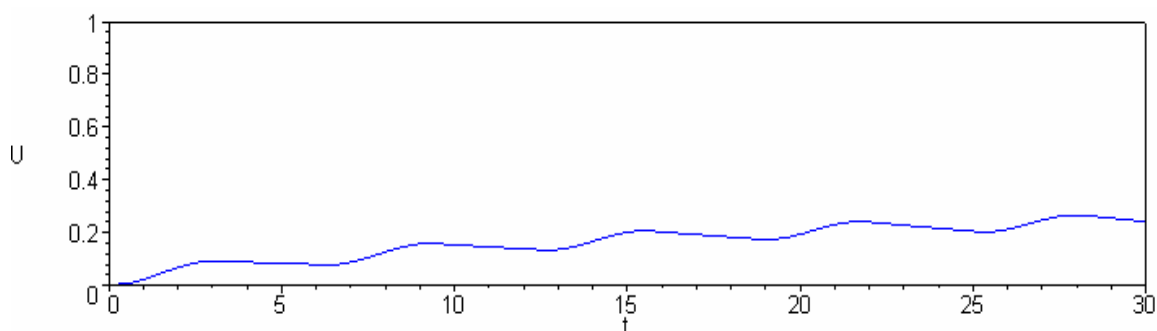


```

> r:=2;R:=40;C:=0.1;E(t):=((sin(t)+abs(sin(t)))/2) ;
r:= 2
R:= 40
C:= .1
E(t):= 1/2 sin(t) + 1/2 |sin(t)|
pr:=diff(u(t),t)=1/r*C*(E(t)-(1+r/R)*u(t));fons:=u(t);
F:=dsolve({pr,u(0)=0},fons,type=numeric,output=listprocedure);
pr:= ∂/∂t u(t) = .02500000000 sin(t) + .02500000000 |sin(t)| - .05250000000 u(t)
fons := u( t )
F := [ t = ( proc ( t ) ... end proc ), u( t ) = ( proc ( t ) ... end proc ) ]
> Y:=subs (F,u (t)) ;
Y:= proc ( t ) ... end proc
> plot(E(t), t=0..30,color=blue,labels=[t,U]) ;
plot(Y,0..30,0..1,color=blue,labels=[t,U]) ;

```





Рекомендации при использовании системы Maple:

система различает заглавные и маленькие буквы;

необходимо строго соблюдать открытие и закрытие как фигурных, так и круглых скобок;

Необходимо аккуратно следить за знаками двоеточие и точка с запятой.

Лабораторные работы №4-14

Тема: «Изучение программирования в Mathcad ».

Рассмотрим в краткой форме процесс моделирования физических задач в системе MathCAD. В этой среде описание записи и решения математических задач дается с помощью привычных математических формул и знаков. Такой же вид имеют и результаты вычислений. Поэтому среда MathCAD вполне оправдывает аббревиатуру CAD (Computer Aided Design), говорящую о принадлежности к сложным и продвинутым информационным системам проектирования и моделирования (ИСПРиМ).

Подробно изучить приемы работы в среде MathCAD можно по специальным руководствам [20, 22, 23, 27, 52, 54,55, 69-70].. Мы же остановимся на применении пакета для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Отметим, что технология работы в данной среде проста и очень нравится студентам. “Общение” с MathCAD повышает интерес студентов к математике, информатике и физике. Студенты получают начальные, профессиональные знания и привыкают к профессиональному языку.

Знакомство с математическим пакетом MathCAD. Интерфейс данного пакета адаптирован для работы пользователя, имеющего элементарные навыки работы с Windows-приложениями.

Под интерфейсом понимается не только легкое управление MathCAD, как с клавишного пульта, так и с помощью мыши, но и просто набор необходимых символов, формул, текстовых комментариев с последующим запуском документов (Worksheets) в реальном времени.

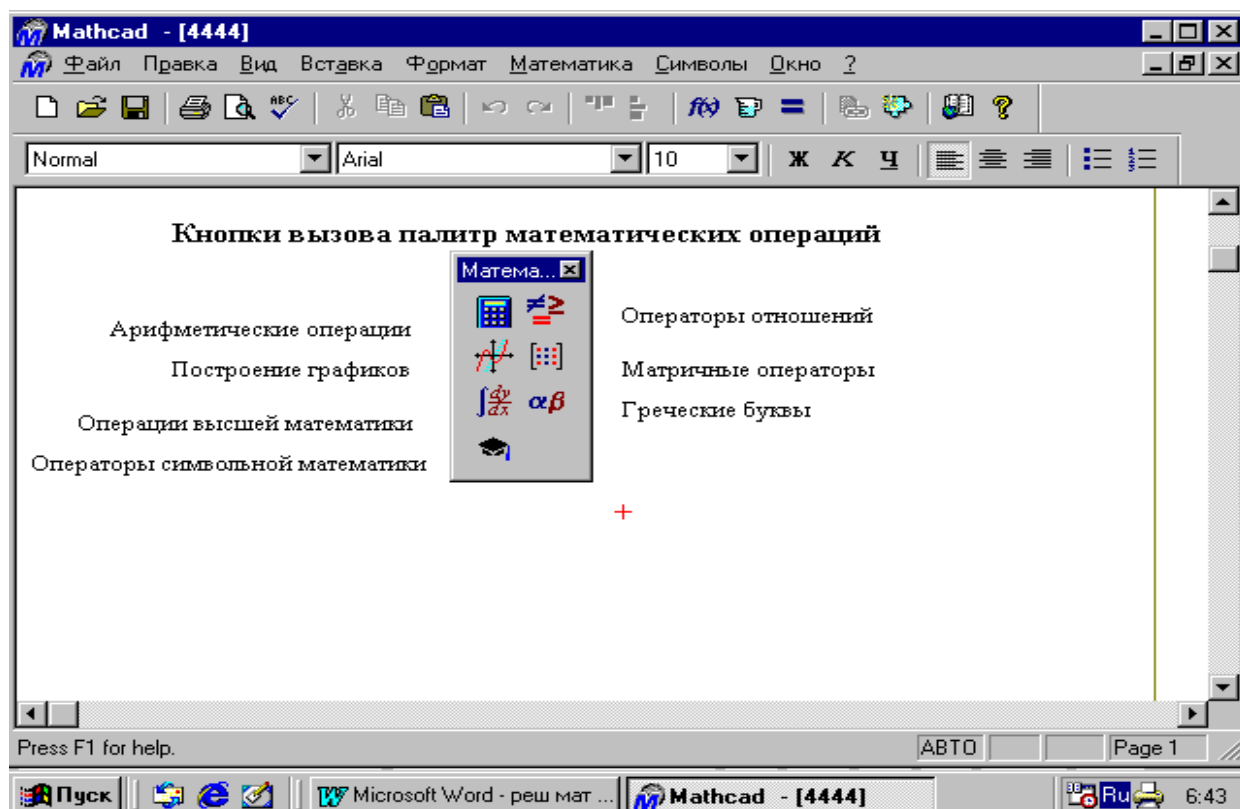


Рис.3.11

Запустив систему MathCAD из Windows, вы увидите на экране окно (рис. 3.11). Над ним видна строка с основными элементами интерфейса. Опции главного меню, содержащиеся в этой строке, легко изучить самостоятельно; некоторые из них очень похожи на стандартные опции, принятые в текстовых редакторах Windows.

Работа с документами MathCAD обычно не требует обязательного использования возможностей главного меню, так как основные из них дублируются кнопками (пиктограммами) на панели инструментов, которые расположены в удобных, перемещаемых с помощью мыши наборных панелях – палитрах. Наборные панели появляются в окне редактирования документов при активизации кнопок. Они служат для вывода заготовок – шаблонов математических знаков (цифр, знаков арифметических операций, матриц, знаков интеграла, производных, пределов и др.). Указатель мыши подводим к “Вид” в главном меню, щелкаем левой кнопкой мыши; указатель подводим к “Панели инструментов” и щелкаем левой кнопкой мыши; выпадает следующее меню. Указатель мыши подводим к “Математика” и щелкаем левой кнопкой мыши. Выпадают наборные панели по различным разделам математики.

Технологии моделирования в MathCAD. Компьютерное моделирование в MathCAD можно провести разными способами:

- с использованием дискретных аналогов математической модели,
 - с использованием готовых процедур пакета,
 - с созданием собственных процедур (программированием).
- Рассмотрим эти способы на примерах решения конкретных задач.

Задача 1. Решить задачу движения тела, брошенного под углом к горизонту и построить его график

Система дифференциальных уравнений, описывающая данный процесс, имеет вид

$$\dot{x} = -k\dot{x}, \quad \dot{x}(0) = v_0 \cos \alpha, \quad x(0) = 0,$$

$$\dot{y} = -k\dot{y} - g, \quad \dot{y}(0) = v_0 \sin \alpha, \quad y(0) = 0.$$

Решение с использованием разностных уравнений. Для решения задачи вводим начальные значения и параметры в окне MathCAD.

$$\begin{aligned} v &:= 0.5 & g &:= 9.8 & a &:= 3.14/4 \\ x_0 &:= 0 & y &:= 0 & h &:= 0.01 \\ i &:= 1 \dots 1000 \end{aligned}$$

Алгоритм решения дифференциальных уравнений, описывающих процесс движения тела брошенного под углом к горизонту, имеет вид

$$\begin{aligned} x_1 &:= v \cdot \cos(a) & y_1 &:= v \cdot \sin(a) \\ x_{i+1} &:= 2 \cdot x_i - x_{i-1} & y_{i+1} &:= 2 \cdot y_i - y_{i-1} - h^2 \cdot g \end{aligned}$$

Здесь мы, записывая разностные уравнения, получаем решение.

Визуализация решения (построение графика) производится следующим образом

Указатель мыши подводим к пиктограмме “Построение графиков” и входим в него, активизируем “Декартов график”. Появляется шаблон для построения графика. На ней выделены метки. Указатель мыши подводим к нижней метке, активизируем. Набираем x_i . Появляются по горизонтали еще две метки, где мы должны указать интервалы построения графика. Указатель мыши подводим к левой метке, щелкая левой кнопкой мыши, активизируем и вводим левую границу **0**. Указатель мыши подводим к правой границе, активизируем и вводим **300**. Уводим указатель мыши к метке оси **Y**, активизируем его и вводим y_i . Появляются метки нижней и верхней границ оси **Y**. В нижней набираем **0**, в верхней **100**. Отводим указатель мыши от шаблона для графиков, щелкаем левой кнопкой мыши. Появляется искомый график

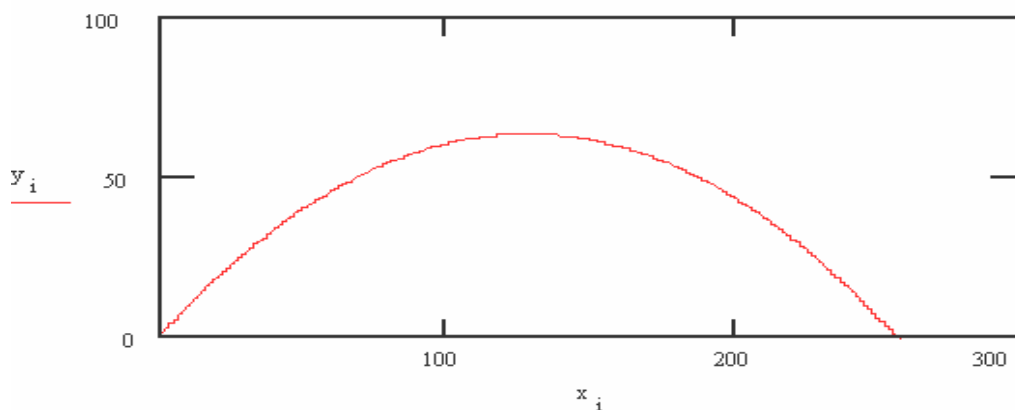


Рис.3.12

Решение с использованием опций (процедур) MathCAD. Чаще всего для решения ОДУ и системы обыкновенных уравнений используются встроенные опции (процедуры) **odesolve**, **rkfixed**, **Rkadapt**, **Radau** и другие.

При использовании опции **odesolve** вначале вводятся постоянные параметры уравнения, затем после слова **Given**, дифференциальные уравнения и начальные условия записываются в привычном виде, например:

$$g := 9.8 \quad a := 3.14/4 \quad k := 0$$

Given

$$\dot{x} = -k\dot{x}, \quad \dot{x}(0) = v_0 \cos \alpha, \quad x(0) = 0,$$

$$\dot{y} = -k\dot{y} - g, \quad \dot{y}(0) = v_0 \sin \alpha, \quad y(0) = 0.$$

$$b := 60 \quad Y := \text{Odesolve}(t, b)$$

Визуализацию результатов проводим аналогично предыдущему примеру. Здесь t переменная интегрирования, b – конечная точка отрезка интегрирования.

Решение с созданием собственных процедур (программированием).

Ниже приведен листинг программы решения задачи движения тела, брошенного под углом к горизонту и с учетом сопротивления среды (падение парашютиста).

Движение тела, брошенного под углом к горизонту

$$g := 9.8 \quad n := 2000 \quad \text{alfa} := 40 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$v_0 := 10 \quad t_{\text{Max}} := \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sin(\text{alfa})}{g}$$

$$h := \frac{t_{\text{Max}}}{n} \quad k := -1 \quad x_0 := 0 \quad y_0 := 0$$

$$V_{x_0} := v_0 \cdot \cos(\text{alfa}) \quad F_x(V_x) := k \cdot V_x$$

$$V_{y_0} := v_0 \cdot \sin(\text{alfa}) \quad F_y(V_y) := k \cdot V_y - g$$

```
(x y) :=
| x_0 ← x_0
| y_0 ← y_0
| V_x ← v_0 · cos(alfa)
| V_y ← v_0 · sin(alfa)
| for i ∈ 0..(n - 1)
|   | ax ← F_x(V_x)
|   | ay ← F_y(V_y)
|   | V_x ← V_x + h · ax
|   | V_y ← V_y + h · ay
|   | x ← x + h · V_x
|   | y ← y + h · V_y
|   | break if (y_{i+1} < 0)
| (x y)
```

stack $\begin{pmatrix} T \\ x, y \end{pmatrix}$ =

	0	1	2	3	4
0					
1					

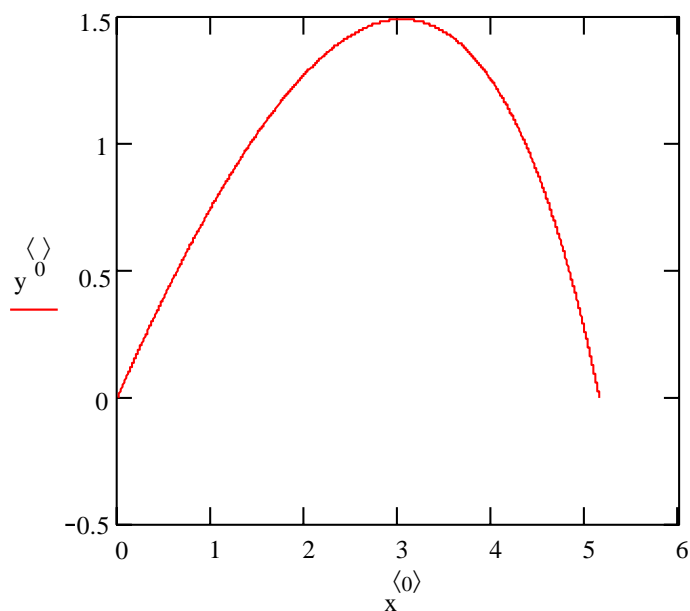


Рис.3.13

Движение тела с учётом сопротивления среды (X убывает)

$n := 4000$ $h := 0.1$ $g := 9.8$ $v_0 := 0$ $m := 60$ $\mu := 0.95$ $r := 0.0025$

$c := 0.4$ $p := 1.29$ $S := 0.4$ $x_0 := n \cdot h$ $t_0 := 0$ $k1 := 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r$ $k2 := 0.5 \cdot c \cdot S \cdot p$ $Fx(v) := g - \frac{(k1 \cdot v + k2 \cdot v \cdot v)}{m}$

(x v a t) :=

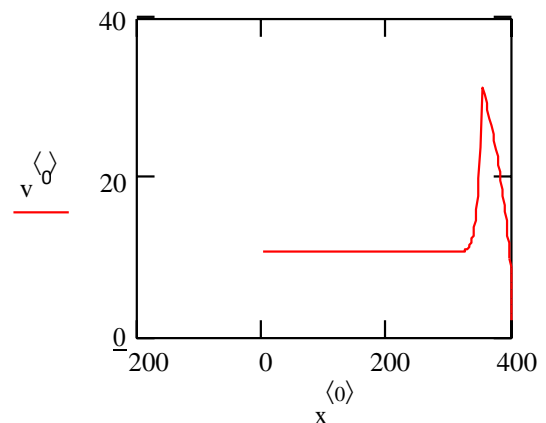
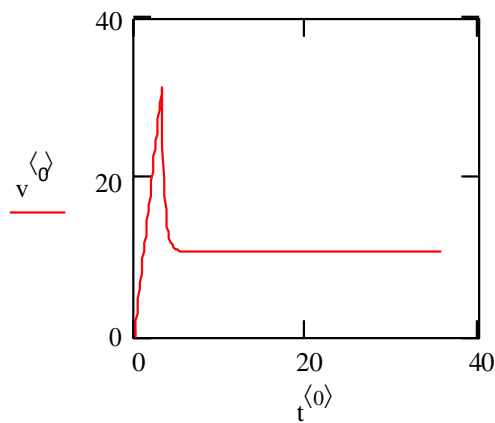
```

x_0 ← x_0
v_0 ← v_0
a_0 ← g
t_0 ← 0
k2 ← 0.5 · c · S · p
for i ∈ 0..(n - 1)
    a_i ← g - (k1 · v_i + k2 · v_i · v_i) / m
    v_{i+1} ← v_i + h · a_i
    x_{i+1} ← x_i + h · (-v_i)
    t_{i+1} ← t_i + h
    (S ← 20) if (t_i > 3)
    k2 ← 0.5 · c · S · p
    break if (x_{i+1} < 0)
(x v a t)

```

$\begin{pmatrix} T & T \\ x, v \end{pmatrix} =$

	0	1	2	3	4
0					
1					



Лабораторная работа №15

Тема: «Моделирование одноконтурной системы автоматического регулирования в VISSIM».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель данной лабораторной работы – используя пакет программ VISSIM, смоделировать систему автоматического регулирования (САР) с оптимальными настройками регуляторов и определить качество САР при варьировании ее параметров.

1. СТАНДАРТНЫЕ БЛОКИ ПАКЕТА ПРОГРАММ VISSIM

Пакет программ VISSIM предназначен для моделирования процессов в системах управления объектами, которые можно описать дифференциальными уравнениями или передаточными функциями. Работа пакета программ VISSIM описана в [1]. Данный пакет предоставляет исследователю богатую библиотеку различного рода блоков структурных схем и вспомогательных блоков (blocks) для моделирования динамических систем. Ниже подробно описаны функции блоков, которые предоставляет данный пакет программ.

1.1. Блоки аннотаций (Annotation)

Пакет VISSIM содержит следующие блоки аннотаций:

- Comment - блок комментария;
- Date - блок текущей даты и времени;
- ScalarToVec - группировка в одну линию нескольких соединительных линий;
- Variable - блок переменной;
- WireLabel - однострочный комментарий;
- VecToScalar - расщепление группового соединения;
- WirePositioner - блок позиционирования соединений на экране для улучшения наглядности.

1. Annotation/comment - блок комментария.

Добавляет окно комментария к схеме. Для ввода текста в окно комментария щелкните ПК мыши на блоке. Курсор мыши изменится на I-знак (мигающий курсор в наборном поле блока), показывающий, что блок находится в режиме вставки. Для выхода из режима вставки снова щелкните ПК мыши на блоке.

2. Annotation/date - блок даты.

Отображает текущую дату и время в формате: день, номер месяца, ч, мин, с, год. Для корректировки времени или даты перейдите в System Control Panel. Этот блок не имеет параметров.

3. Annotation/scalarToVec - блок объединения сигналов.

Объединяет входные сигналы в одну векторную связь. Используйте Edit/Add Input и Edit/Remove Input для изменения числа входных меток. По умолчанию - три. Этот блок не имеет параметров.

4. Annotation/variable - блок переноса переменной.

Передаст значения данных через схему без гибких связей. Блоки имеют названия совместно используемых сигналов. Только один блок, давший имя переменной, может иметь вход, но блоки переменной могут иметь несколько выходов. Переменная определяет имя блока. Если имя переменной начинается двосточием (:), то это локальная переменная, на которую можно ссылаться только на текущем уровне схемы, что позволяет вам использовать блоки с одинаковым именем в различных составных блоках. Имеется три специальных имени переменных, встроенных в VISSIM:

- \$firstPass - генерирует начальный единичный импульс на первом шаге моделирования;
- \$lastPass - генерирует заключительный единичный импульс на последнем шаге моделирования;
- \$runCount - содержит счетчик количества итераций при многократном выполнении моделирования. Используйте эту переменную с параметром автоматического запуска

из Simulate/Change Parameters... для выполнения моделирования методом Monte Carlo и подстройки параметров.

5. Annotation/vecToScalar - блок разделения объединенных сигналов.

Разбивает векторную связь на скалярные выходные сигналы. Используйте команды Edit/Add Output и Edit/Remove Output для установления числа выходных меток. По умолчанию - три. Этот блок не имеет параметров.

6. Annotation/wireLabel - текстовый комментарий на поле модели.

Вставляет однострочный комментарий, соответствующий помеченной части схемы. Для установки или подавления изображения используйте параметр Box WireLabels в диалоговом окне Edit/Preferences... WireLabel определяется комментарием.

7. Annotation/wirePositioner - блок для позиционирования проводов.

Позволяет располагать гибкие связи с минимальными нагромождениями на экране. Блок состоит из входной и выходной меток, соединенных гибкой связью. Они не требуют дополнительного времени на вычисления во время моделирования. Этот блок не имеет параметров.

1.2. Арифметические блоки (Arithmetic)

Пакет VISSIM содержит следующие арифметические блоки:

1/x - инверсия входной величины: выходной сигнал равен обратной величине входного: $y = 1/x$ (не путать с блоком деления).

-x - инвертор знака, знак выхода противоположен знаку входа: $y = -x$.

* - блок умножения, количество входов может быть любым: $y = x_1 \times x_2$.

/ - блок деления имеет два входа, его выход равен отношению величин верхнего и нижнего входных сигналов: $y = x_1/x_2$.

abs - блок, вычисляющий абсолютное значение входного сигнала: $y = |x|$.

gain - блок-усилитель с одним входом, выполняет умножение сигнала на константу, которая вводится в меню блока: $y = ax$.

pow - блок с двумя входами возведения первого сигнала x_1 в степень, равную величине второго сигнала x_2 (второй сигнал может отсутствовать, в этом случае степень по умолчанию равна двум): $y = x_1^{x_2}$.

sign - определяет знак входного сигнала: $y = \text{sign}(x)$.

SummingJunction - сумматор, количество входов и знаки слагаемых можно изменять: $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n + C$, имеет начальное смещение выхода C , которое устанавливается в меню блока.

1.3. Логические блоки (Boolean)

Пакет VISSIM содержит следующие логические блоки с двумя входами и одним выходом, который может принимать значения 0 или 1:

$>$ (x_1 больше, чем x_2);

$<$ (x_1 меньше, чем x_2);

\geq (x_1 больше или равно x_2);

\leq (x_1 меньше или равно x_2);

$=$ (x_1 равно x_2);

\neq (x_1 не равно x_2);

and - поразрядное "И" x_1 и x_2 ;

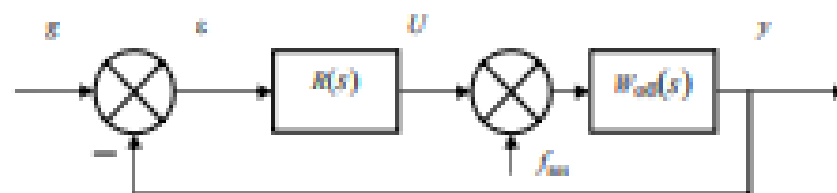
формирования схем нет. Нажмите ПК мыши на составном блоке для просмотра его структуры. Для возврата на верхний уровень нажмите ПК мыши на свободном поле экрана.

Чтобы создать составной блок, сначала выберите блоки, которые вы хотите сгруппировать (инкапсулировать). Установите курсор в левом верхнем углу области экрана, которую занимают группируемые блоки, и нажмите ЛК мыши. Удерживая клавишу, смещайте курсор в противоположный угол области, при этом на экране образуется прямоугольный контур, который должен охватить выбираемые блоки. После отпускания клавиши блоки, содержащиеся в контуре, будут выбраны (выделяются красным цветом). Выберите команду меню Edit/Create Compound Block, при этом появится окно диалога, куда вы можете ввести имя составного блока. Имя должно содержать не больше чем 32 символа и не должно содержать точечный символ (.). Система перерисовывает схему с отображением созданного составного блока, присоединяет метки таблицы соединителей и автоматически создает внутренние соединения для всех несвязанных меток таблицы соединителей на внутренних блоках (кроме входных соединителей на глобальных переменных) и для всех меток таблицы соединителей к внешним блокам. Для просмотра составного блока нажмите ПК мыши на блоке.

Для отмены инкапсуляции необходимо, войдя внутрь сложного блока, скопировать или переместить схему блока в буфер системы командой Edit/copy или Edit/cut, затем, выйдя на верхний уровень иерархии, удалить сложный блок и установить содержимое сложного блока из буфера командой Edit/paste. При этом все внешние соединения установленной части схемы необходимо восстановить "вручную".

2. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. В рабочей области пакета VISSIM собрать схему одноконтурной САР, представленной на рисунке [2], где введены следующие обозначения: g - задающее воздействие (уставка); $f_{\text{ин}}$ - внутреннее возмущение по каналу регулирования; ε - сигнал ошибки; U - управляющее воздействие на объект управления (ОУ); y - выходной сигнал ОУ; $R(s)$ - передаточная функция (ПФ) регулятора; $W_{\text{об}}(s)$ - ПФ объекта управления по управляющему воздействию.



Структурная схема одноконтурной САР

Передаточная функция ОУ в упрощенном виде:

$$W_{\text{об}}(s) = k_{\text{об}} \frac{1}{T_{\text{об}}s + 1} e^{-\tau_{\text{об}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{об}}$ - коэффициент передачи ОУ; $T_{\text{об}}$ - постоянная времени ОУ; $s = \sigma + j\omega$ - комплексная переменная преобразования Лапласа;

$\tau_{\text{об}}$ - транспортное запаздывание ОУ, с.

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

Лабораторная работа №16
Тема: «3-D моделирование в КОМПАС»

Создать 3 Д модель.

