ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Т.Н. Зайченко

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методическое пособие по лабораторным занятиям для магистров направления 210100 «Электроника и наноэлектроника»



ТОМСК – 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Т.Н. Зайченко

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методическое пособие по лабораторным занятиям для магистров направления 210100 «Электроника и наноэлектроника» Рецензент: профессор кафедры промышленной электроники ТУ-СУРа, к-т техн. наук **В.Д. Семенов**

Т.Н. Зайченко

Методы математического моделирования: Методическое пособие по лабораторным занятиям для магистров направления 210100 – Электроника и наноэлектроника». – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. – 77 с.

Приведены описания четырех лабораторных работ.

Методическое пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 210100 – «Электроника и наноэлектроника» по ФГОС-3.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Порядок выполнения работы и отчетность	5
Лабораторная работа № 1. Исследование влияния методов и параметров моделирования на адекватность компьютерных моделей	6
Лабораторная работа № 2. Исследование процесса моделирования электрических цепей и устройств электроники в программе PSpice CAПP OrCAD	15
Лабораторная работа № 3. Исследование способов создания моделей элементно-узловой базы в системах моделирования	33
Лабораторная работа № 4. Исследование методов идентификации	49

ВВЕДЕНИЕ

В методическом пособии приведены описания четырех лабораторных работ (ЛР) по дисциплине «Методы математического моделирования» для магистров, обучающихся по направлению 210100 – «Электроника и наноэлектроника» по ФГОС-3.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

– способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности (ОК-2);

– способность понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения (ПК-3);

– готовность формулировать цели и задачи научного исследования в соответствии с тенденциями и перспективами развития ЭиНЭ, а также смежных областей науки и техники, способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-16);

– способность разрабатывать с использованием современных языков программирования и обеспечивать программную реализацию эффективных алгоритмов решения сформулированных задач (ПК - 17);

– готовность осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени (ПК-18);

– способность владеть современными методами расчета и проектирования устройств квантовой и оптической электроники по заданным техническим требованиям, способность к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования (ПСК-2 для профиля 210105);

– способность самостоятельно разрабатывать модели исследуемых процессов, электронной компонентной базы, приборов и устройств электронной техники (ПСК-4 для профилей 210116, 20117).

В процессе выполнения ЛР магистры получают знания, умения и навыки по организации вычислительного эксперимента и применению методов математического моделирования.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОТЧЕТНОСТЬ

Перед выполнением ЛР необходимо ознакомиться с ее описанием, изучить порядок выполнения и теоретический материал, приготовить необходимые таблицы.

Продолжительность каждой ЛР – 4 часа. Работа выполняется группой студентов из двух человек либо индивидуально.

Максимальный рейтинг ЛР – 10 баллов. Отчет сдается в день выполнения ЛР либо на первом после выполнения ЛР практическом либо лабораторном занятии. В случае несвоевременной сдачи отчета балльная оценка снижается на 20% за каждую неделю сдачи отчета после установленного срока.

Полученные данные вычислительного эксперимента оцениваются и сравниваются с теоретическими положениями, обрабатываются, обобщаются и представляются в виде отчета.

Отчет должен содержать:

– номер и название работы, дату выполнения, номер студенческой группы и фамилии исполнителей;

– цель и программу работы, необходимые модели и результаты вычислительного эксперимента;

– краткие выводы по полученным результатам вычислительного эксперимента.

Отчет составляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА АДЕКВАТНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цель работы. Изучение влияния численного метода и параметров моделирования на корректность и адекватность моделей в современных средствах компьютерного моделирования.

Программа работы

Получить номер варианта лабораторной работы.

1. Исследовать в системе Matlab/Simulink процесс моделирования объекта с математической моделью монотонного характера.

Выполняется на примере моделирования во временной области сигнала f(t) (табл. 1.1).

Таблица 1.1

	Функ	ция $f(t)$	E_m	<i>f</i> , Гц
	$E_m \sin(\omega t) E_m \sin\left(\frac{1}{2}\omega t\right)$	$E_m \sin(\omega t) + \frac{1}{2} E_m \sin(2\omega t)$		
Вариант	1	6	1	50
	2	7	10	400
	3	8	20	1000
	4	9	30	2500
	5	10	40	5000

Исходные данные для пункта 1

1.1. Создать в Matlab/Simulink расчетную схему для моделирования. Выполнить моделирование с методом и параметрами моделирования, устанавливаемыми в Matlab/Simulink по умолчанию.

Схему и характерные временные диаграммы электромагнитных величин представить в отчете.

Чтобы метод и все параметры моделирования Matlab/Simulink были установлены по умолчанию, рекомендуется создать новый файл схемы (команда «File/ New»).

1.2. Исследовать процесс решения модели с параметрами Matlab/Simulink по умолчанию:

– определить **числовые значения** шагов моделирования (начального h_0 , минимального h_{\min} , максимального h_{\max}), устанавливаемых в Matlab/Simulink по умолчанию;

- оценить адекватность модели.

Точное значение шага решения можно определить:

– по выходным массивам переменных рабочего пространства Workspace;

– по графикам.

Пример определения шага по графику, полученному по команде «plot», представлен на рис. 1.1. Визуализацию расчетных точек можно реализовать путем задания маркера «Marker» (пиктограмма «Show Plot Tools and Dock Figure»), а для исследования величины шага использовать курсор (пиктограмма «Data Data Cursor»).

1.3. Варьируя значения шагов моделирования добиться получения адекватной модели. Записать **числовые** значения шагов моделирования, обеспечивающие получение адекватной модели. Определить критическое значение максимального шага $h_{\max kp}$, при превышении которого модель становится неадекватной.



Рис. 1.1. Окно выдачи результатов моделирования по команде

Значения параметров моделирования и характерные временные диаграммы электромагнитных величин адекватной модели представить в отчете.

1.4. Сформулировать правила выбора параметров моделирования.

2. Исследование процесса моделирования объекта со скачкообразным характером протекающих процессов.

Выполняется на примере моделирования в системе Matlab/Simulink реакции последовательной RC-цепи с параметрами согласно табл. 1.2 на подключение источника постоянной ЭДС, время включения которого задано через параметр т – постоянную времени RC-цепи.

Таблица 1.2

	Время включен	ия источника ЭДС	Ε,	<i>R</i> ,	С,
	2τ	3τ	В	Ом	мкФ
Вариант	1	6	1	1	100
	2	7	5	10	200
	3	8	10	50	500
	4	9	20	100	75
	5	10	50	20	22

Исходные данные для пункта 2

2.1. Создать схему и выполнить исследование с методом и параметрами моделирования Matlab/Simulink, заданными по умолчанию.

Схему и характерные временные диаграммы электромагнитных величин представить в отчете.

2.2. Определить шаги моделирования, устанавливаемые в Matlab/Simulink по умолчанию, записать их числовые значения в отчете.

2.3. Варьируя параметры моделирования добиться получения адекватной модели переходного процесса в RC-цепи.

Определить критическое значение максимального шага $h_{\max kp}$, при превышении которого модель становится неадекватной.

Записать числовые значения параметров моделирования и критическое значение максимального шага моделирования.

2.4. Сформулировать правила выбора параметров моделирования.

3. Исследование адекватности моделей объектов с осциллирующими на длительном интервале процессами.

Исследование производится на примере схемы высокодобротного фильтра, представленной на рис. 1.2, с параметрами согласно табл. 1.3.

Для всех вариантов принять:

-R3 = 10 кОм.

– интервал моделирования – от 0 до 14000 с.



Рис. 1.2. Схема высокодобротного фильтра

Таблица 1.3

Исходные данные для пункта 3

Вариант	<i>E</i> , B	R_1 ,	R_2 ,	C_1 ,	<i>C</i> ₂ ,	<i>C</i> ₃ ,	L_1 ,	<i>L</i> ₂ ,
		Ом	Ом	Φ	Φ	Φ	Гн	Гн
1	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1	100	10,01	9,99
2	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	50	20,02	19,98
3	0,03	0,03	0,03	0,033	0,033	33.333	30,03	29,97
4	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	10	100,1	99,9
5	0,2	0,2	0,2	0,005	0,005	5	200,2	199,8
6	0,3	0,3	0,3	3,333	3,333	3.333	300,3	299,7
				x10 ⁻³	x10 ⁻³			
7	0,001	0,001	0,001	1	1	1000	1,001	0,999
8	0,002	0,002	0,002	0,5	0,5	500	2,002	1,998
9	1	1	1	0,001	0,001	1000	1001	999
10	2	2	2	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	500	2002	1998

3.1. Решить задачу моделирования фильтра в системе Matlab/Simulink.

Построить схему фильтра, реализовать ее моделирование различными численными методами с параметрами, устанавливаемыми по умолчанию, представляя данные в табличном виде (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Результаты моделирования фильтра в системе MatLab/Simulink

№ п/п	Метод		Pe	зульта	ты мо,	делиро	эвания	ſ	
1	ode23	<u>Y4</u> 0	2000	4000	6000	I I 8000	1.104	1.2.10 ⁴	1.4 ·10 ⁴
2	ode45								
3	ode113								
4	ode15s								
5	ode23s								
6	ode23t								
7	ode23tb								

3.2. Исследовать зависимость адекватности модели фильтра от точности решения в системе MathCad с использованием встроенных численных методов решения систем дифференциальных уравнений.

3.2.1. Записать математическую модель цепи в координатном базисе метода переменных состояния, т.е. относительно токов индуктивностей и напряжений на конденсаторах.

3.2.2. Написать в MathCad программу решения модели с использованием встроенных функции решения систем дифференциальных уравнений:

– Radau;

– Stiffb;

– Stiffr.

Предусмотреть оператор задания точности TOL.

3.2.3. Решить модель, выдавая на график характерные токи и напряжения (переменные состояния).

3.2.4. Исследовать зависимость решения от точности моделирования TOL. Точность менять до получения неизменных результатов.

Результаты исследования представить в виде табл. 1.5.

3.2.5. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о результатах и об адекватности модели.

Таблица 1.5

Результаты моделирования фильтра в системе MathCad

No	Значение па-	Результаты моделирования, ток резистора R2
п/п	раметра TOL	
		Метод Radau
1	0,1	$Y_4 = 0$
2	0,01	
	1.10-9	
		•••
		Meтод Stiffb

3.3. Решить задачу моделирования фильтра в системе Matlab с использованием встроенных функций, реализующих численные методы решения систем дифференциальных уравнений.

3.3.1. Записать программу решения системы дифференциальных уравнений для модели фильтра на основе метода переменных состояния.

3.3.2. Исследовать зависимость решения от численного метода. Результаты исследования представить в виде табл. 1.5.

3.3.3. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о результатах и об адекватности модели.

Фрагмент программы решения дифференциальных уравнений с использованием численного метода ode23 на языке Matlab имеет вид (вектор правой части системы уравнений не соответствует схеме лабораторной работы):

```
%% c1, c2, c3, r1, r2, l1, l2 - параметры элемен-
тов % схемы;
% t - время;
% у - вектор переменных состояния;
% у0 - вектор начальных условий;
00
% Задание указателя на функцию, вычисляющую
% правую часть дифференциального уравнения;
% элементы вектора правой части задаются в
% квадратных скобках через точку с запятой:
r2*y(4))*l1;(y(4)+y(3))*l2];
% Задание интервала анализа от 0 до 1:
tspan=[0,1];
% Задание начальных условий:
y0 = [0;0;0;0;0];
% Обращение к функции расчета методом ode23:
[t,y]=ode23(rlc,tspan,y0);
% Построение графика:
plot(t,y(:,5));title('Фильтр, 5-я переменная со-
стояния, ток резистора R2');
```

3.4. Решить задачу моделирования фильтра аналитическим методом в системе MathCad.

3.4.1. Написать в MathCad программу для расчета реакции цепи на ступенчатое воздействие [2]. Предусмотреть выдачу на графики характерных токов и напряжений (всех переменных состояния).

3.4.2. Сравнить полученные результаты с результатами п. 3.1 – 3.3, сделать выводы о полученных результатах и об адекватности модели.

4. Оформить отчет о проделанной работе. Сформулировать выводы по каждому из пунктов 1 – 3 проделанной работы.

В выводах:

– отразить анализ полученных результатов;

- дать оценку адекватности моделей;

– дать рекомендации по выбору методов и параметров моделирования.

Контрольные вопросы

1. Какие численные методы используются при решении задач моделирования в системе Matlab/Simulink?

2. Перечислите основные параметры моделирования в Matlab/Simulink.

3. Поясните назначение параметров моделирования «Start time», «Stopt time».

4. Поясните назначение опций моделирования «Solver», «Туре», «Max step size», «Min step size», «Initial step size», «Relative tolerance», «Absolute tolerance» и др.

5. Поясните назначение опций «Fixed-step», «Variable-step» и их влияние на процесс решения модели.

6. В чем отличие явных и неявных численных методов интегрирования?

7. Дайте характеристику метода интегрирования и приведите математическую модель схемы интегрирования.

8. Поясните назначение и параметры функций MathCad:

– Radau;

– Stiffb;

– Stiffr.

9. Поясните оператор решения системы дифференциальных уравнений в системе Matlab.

Формирование оценки

N⁰	Этап задания	Оценка,
п/п		баллы
1	Задание п. 1	0,5
2	Задание п. 2	0,5
3	п. 3.1	2
4	п. 3.2	2
5	п. 3.3	2
6	п. 3.4	2
7	Выводы	1
	Итого	10

Литература

1. Дьяконов В. П. МАТLAВ 7.*/R2006/R2007: Самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

2. Егоров И.М. Программирование: Учебное методическое пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. — 79 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ В ПРОГРАММЕ PSPICE САПР OrCAD

Цель работы. Получить навыки работы в САПР OrCAD; исследовать основные этапы процесса моделирования электронных устройств.

Программа работы

1. Получить навыки моделирования электрических цепей в программе PSpice CAПР OrCAD.

Выполняется на примере моделирование реакции последовательной RC-цепи с параметрами согласно табл. 2.1 на подключение источника постоянной ЭДС, время включения которого задано через параметр т – постоянную времени RC-цепи.

Таблица 2.1

	Время включен	ия источника ЭДС	Ε,	<i>R</i> ,	С,
	2τ	3τ	В	Ом	мкФ
Вариант	1	6	1	1	100
	2	7	5	10	200
	3	8	10	50	500
	4	9	20	100	75
	5	10	50	20	22

Исходные данные для пункта 1

1.1. Создать проект с возможностью моделирования в PSpice.

1.2. Научиться работать с библиотеками элементов. Создать схему для моделирования RC-цепи, задать параметры элементов.

1.3. Подключить маркеры для визуализации токов и напряжений.

1.4. Создать профиль моделирования и задать параметры для моделирования RC-цепи во временной области. Оценить адекватность модели. Варьируя параметры моделирования добиться получения адекватной модели.

1.5. Выполнить моделирование RC-цепи во временной области. Результаты моделирования представить в виде **трех графиков**: на один выдать ток, на второй – все напряжения (источника, на резисторе и конденсаторе), на третий – все мощности.

1.6. В отчете представить: схему RC-цепи, профиль и значения параметров моделирования, временные диаграммы токов и напряжений.

2. Изучить модели полупроводниковых приборов в программе PSpice CAПР OrCAD.

2.1. Изучить параметры полупроводникового диода.

Составить список (таблицу) идентификаторов и функциональных назначений параметров.

2.2. Изучить параметры биполярного транзистора.

Составить список (таблицу) идентификаторов и функциональных назначений параметров.

2.3. Изучить эквивалентные модели диода и транзистора.

2.4. В отчете представить:

– таблицы параметров диодов и транзисторов;

- эквивалентные модели PSpice-моделей диодов и транзисторов;

– выводы об области применения PSpice-моделей полупроводниковых приборов и сравнительный анализ PSpice-моделей и Simulinkмоделей по типу моделей и их параметров и области применения.

3. Исследовать процесс моделирования схем с полупроводниковыми приборами в программе PSpice CAПР OrCAD.

Выполняется на примере моделирования выпрямителя согласно табл. 2.2. Здесь *U* – амплитуда напряжения вторичной обмотки. Результаты моделирования представить в виде **четырех** графиков: на один выдать токи диодов, на второй – напряжения на диодах; на третий – входные напряжения; на четвертый – выходное напряжение.

Таблица 2.2

		Тип с	хемы		<i>f</i> ,	Модель	U_{\min} ,
	Moc	товая	Нул	іевая	Γц	диода	U_{\max} ,
	1-фазная	3-хфазная	1-фазная	3-хфазная			В
Ba	1	7	13	19	50	D2104A	200;600
ри-	2	8	14	20	400	D1D2C1	50; 250
ант	3	9	15	21	1000	D10D1	50; 200
	4	10	16	22	50	D1S1553	20; 80
	5	11	17	23	400	KD509A	10; 60
	6	12	18	24	1000	KD522B	5;40

Таблица исходных данных для моделирования выпрямителя

2.1. Создать проект с возможностью моделирования.

2.2. Создать схему и профиль моделирования для исследования выпрямителя во временной области. При этом допускается переход к модели выпрямителя с бестрансформаторным входом. Подключить маркеры для визуализации токов и напряжений.

2.3. Выполнить моделирование во временной области при минимальном напряжении U_{\min} (см. табл. 2.2). Оценить адекватность модели. Варьируя параметры моделирования добиться получения адекватной модели. В отчете представить: схему, параметры моделирования и характерные временные диаграммы электромагнитных величин.

2.4. Выполнить моделирование выпрямителя при различных значениях входного напряжения. **Результаты моделирования представить** в виде табл. 2.3.

Результаты моделирования выпрямителя в САПР OrCAD

No	Амплитуда питающего	График временной
п/п	напряжения, В	диаграммы напряжения на нагрузке
1	U_{\min}	
2		
5	U _{max}	

Изменяя величину амплитуды питающего напряжения определить ее критическое значение, при котором изменяется вид временных диаграмм. Сделать выводы о причинах изменения характера процессов.

Краткие сведения из теории

1. Состав пакета OrCAD

Система OrCAD состоит из набора вполне автономных программных модулей, каждый из которых может использоваться отдельно для решения частных задач проектирования электронных схем.

Основными компонентами системы OrCAD являются (рис. 2.1):

– OrCAD Capture – графический редактор схем. С этой программы обычно начитается работа над проектом.

– OrCAD Capture CIS (Component Information System), менеджер библиотек электронных компонентов;

– **PCB Editor** – редактор топологии печатных плат;

– **РСВ Router** – трассировщик печатных плат;

– **PSpice AD** – программа моделирования аналоговых и смешанных аналогоцифровых (Analog Digital) электронных схем;

- PSpice Advanced Analysis - MO-

•	Design Entry CIS
F	Design Entry HDL
*	Design Entry HDL Rules Checker
۲	FPGA System Planner
T	Library Explorer
思	License Client Configuration Utility
Ŵ	Model Integrity
•	OrCAD Capture
•	OrCAD Capture CIS
×	OrCAD PCB Editor
	OrCAD PCB Router
Sig Iplotet	OrCAD SigXplorer
	Package Designer
×	PCB Editor
17	PCB Router
×	PCB SI
×	Physical Viewer
•	Project Manager
	PSpice AD
ų,	PSpice Advanced Analysis
	README CCR
Sig Optionen	SigXplorer
	SiP
Z	SiP Digital Architect
2	System Architect
a	Web Update

Рис. 2.1. Состав САПР Ог-САD дуль параметрической оптимизации электронных схем.

2. Создание проекта в OrCAD

Проектирование устройства начинается с создания его принципиальной схемы. В зависимости от сложности устройства схема может быть простой или иерархической. В системе OrCAD принципиальная схема (файл с расширением .dsn, называемый Design) и сопутствующие файлы объединяются в проект (Project, файл с расширением .opj).

Проекты создаются в редакторе Capture с помощью мастера проектов. Для создания нового проекта нужно: запустить **Capture**, в меню File выбрать **New project** или нажать соответствующую кнопку на панели инструментов.

В окне мастера проектов (рис. 2.2) необходимо ввести имя создаваемого проекта (латинскими буквами) (окошко **Name**) и выбрать тип проекта. В окошке **Location** нужно указать место размещения файлов создаваемого проекта (латинскими буквами). Папку проекта можно выбрать, нажав кнопку **Browse**.

Предусматриваются следующие типы проектов:

1. Analog or Mixed A/D – аналоговые, цифровые или смешанные аналого- цифровые устройства, моделируемые с помощью программы PSpice A/D (возможна также дальнейшая разработка печатной платы в Layout).

2. PC Board Wizard – печатные платы (моделирование смешан-

ных аналого-цифровых устройств выполняется с помощью PSpice). Необходимость проведения моделирования указывается в диалоговом окне PCB Project Wizard. Для добавления возможности моделирования нужно пометить галочкой строку Enable project simulation.

3. **Programmable Logic Wizard** – проектирование программмируемых логических матриц.

ame	<u>ОК</u>
	Cancel
Create a New Project Using	Help
	Tip for New Users Create a new Analog or Mixed A/D project. The new project may be blank or copied from an existing template.
cation	
:\WORK\02_ТУСУР_ТОЭ_ПрЭ\!!!ПРЭ_Матмод	елирование\П B <u>r</u> owse

Рис. 2.2. Создание нового проекта

4. Schematic – не специализированные проекты (возможно только создание и документирование принципиальных схем, моделирование и разработка печатных плат не предусматривается).

2.1. Создание проекта типа Analog or Mixed A/D

В окне создания проекта (Create PSpice Project) (рис. 2.3) предлагается создать новый проект на базе имеющегося (Create based upon an existent project), который будет служить отправной точкой, или «пустой» проект (Create a blank project).

	×
[ОК
•	B <u>r</u> owse
	Cancel
	<u>H</u> elp

Рис. 2.3. Создание проекта с возможностью моделирования в PSpice

В качестве базового может использоваться любой ранее созданный проект, который можно указать нажав кнопку Browse. Базовый проект также можно выбрать из списка выпадающего меню.

Это может быть проект:

- простой (simple.opj),
- иерархический (hierarchical.opj),
- простой со всеми библиотеками (simple_all_libs.opj),
- иерархический со всеми библиотеками (herarchicle_all_libs.opj).

2.2. Создание проекта типа PC Board Wizard

В окне PC Board Wizard (рис. 2.4) можно разрешить моделирова-

ние электронной схемы в PSpice (Add Simulation to project) – мастер добавит соответствующие ресурсы в проект.

Далее предлагается выбрать биб-

PCB Project Wizard			×
	e project simulation		
Ad	d <u>a</u> nalog or mixed-si	gnal simulation resour	ces.
O Ad	d <u>V</u> HDL-based digita	I simulation resources	
⊖ Ad	d Ve <u>r</u> ilog-based digi	tal simulation resource	S.
	< <u>B</u> ack <u>N</u> ex	t> Cance	l Help

Рис. 2.4. Окно мастера проектов РСВ

лиотеки электронных компонентов (рис. 2.5), которые планируется использовать в проекте.

PCB Project Wizard			×
Select the PSpice Part symbol libraries that you wish to include in your project. <u>1_shot olb</u> 7400.olb 74ac.olb 74ac.olb 74act.olb 74as.olb 74as.olb 74as.olb 74as.olb 74f.olb 74h.olb	<u>A</u> dd >> << <u>R</u> emove	Use these libraries analog.olb source.olb sourcstm.olb special.olb	
	Finish	Cancel H	elp

Рис. 2.5. Выбор библиотек для проекта РСВ

Если в процессе работы над проектом окажется, что требуется не включенная ранее библиотека, ее можно добавить.

3. Настройка редактора схем Capture

Доступ к настройкам обеспечивается через меню Options, состав которого меняется в зависимости от активного окна.

Вне зависимости от активного окна доступны:

1. **Preferences** – для задания настроек редактора Capture, которые применяются ко всем открываемым проектам.

2. **Design Template** – настройки, применяемые к вновь создаваемым проектам, на созданные ранее не влияют.

3. Product Configuration – выбор разновидностей Capture и PSpice.

Если активным является окно редактора схем, доступна опция Schematic Page Properties.

Доступ этому окну также можно получить из контекстного меню, которое появляется при щелчке правой кнопкой мыши на вкладку страницы схемы в окне менеджера проектов.

3.1. Окно Preferences

Окно Preferences содержит несколько закладок.

В закладке Colors/Print задаются цвет объектов для их отображения на экране компьютера. Галочкой можно отметить, будут ли эти элементы выводиться при печати. Кнопка Use Default позволяет вернуть первоначальные установки.

Grid Display – отображение сетки. Отдельно для редактора схем и редактора символов можно включить отображение сетки, переключить стиль сетки: отображать узлы точками (Dots) или рисовать сетку линиями (Lines). В этой закладке включается привязка курсора к сетке. Шаг сетки в Capture менять нельзя, он задается для вновь создаваемых проектов в Design Template, вкладке Page Size. Невозможность изменить шаг сетки не является существенным недостатком, поскольку привязку к сетке можно отключить.

Рап and Zoom позволяет установить коэффициент увеличения/уменьшения (Zoom Factor) при изменении масштаба и скорость автоматического перемещения (Auto Scroll) по листу при приближении курсора с выделенным объектом (перемещении) к краю окна. Если этот параметр установлен в 0, автоматическая прокрутка отключается. Как и в предыдущей закладке, вышеперечисленные параметры устанавливаются отдельно для редактора элементов и редактора схем.

Select настраивает способ выделения элементов схемы. При включенном Intersecting выделяются все объекты, которые даже частично попали в область выделения. Fully Enclosed позволяет определить выделение только для тех объектов, которые полностью попали в область выделения. Здесь же определяется максимальное число выделенных элементов, при котором будет сохраняться качественное отображение их начертаний во время перемещения. Если число выделенных объектов превосходит установленное, при перемещении будут отображаться только их контуры.

Две последние вкладки позволяют изменить настройки по умолчанию при редактировании графики в окне редактора схем и элементов, изменить настройки текстового редактора и параметры автосохранения.

3.2. Окно Design Template

В окне **Design Template** определяются настойки по умолчанию для вновь создаваемых проектов, на текущий и ранее созданные проекты они действия не оказывают. Окно имеет ряд вкладок.

Fonts позволяет задать шрифты, которые будут использоваться по умолчанию для различных текстовых элементов.

Title Block определяет значение полей углового штампа, а также позволяет определить библиотеку, в которой находится угловой штамп, имя углового штампа, который будет использоваться по умолчанию. С пакетом OrCAD поставляется библиотека capsym.olb в которой находятся угловые штампы стандартов ISO и ANSI.

Раде Size задает единицы измерения и размер листов схемы по умолчанию. Доступны листы стандартных размеров, также можно задавать произвольные размеры листа. В этой вкладке определяется расстояние между выводами элементов схем, что соответствует шагу сетки в окне редактора схем. Следует иметь в веду, что изменение этого параметра повлияет на масштаб имеющих выводы графических элементов схемы.

Grid Reference определяет разбивку поля чертежа на зоны, отображение разбивки, рамки и углового штампа в окне редактора схем и при печати.

Hierarchy определяет типы иерархических блоков и элементов по умолчанию.

STD Compatibility определяет соответствие полей элементов при преобразовании в STD формат.

3.3. Окно Schematic Page Properties позволяет определить установки текущей страницы открытого проекта.

Проект может состоять из нескольких страниц, и для каждой из них могут быть заданы различные свойства, такие как размер листа (закладка **Page Size**), отображение рамки, разбивки на блоки и углового штампа (**Grid Reference**). В закладке **Miscellaneous** можно посмотреть дату и время создания и последнего изменения листа. Все вкладки повторяют те, что присутствуют в окне Design Template.

4. Создание схем в редакторе Capture

4.1. Объекты чертежа схемы

Редактирование схем формально можно представить как размещение на листе схематических обозначений электронных компонентов (part) и соединение их выводов проводниками (wire).

Проводники могут объединяться в шины (bus), для подключения к которым используются вводы (bus entry). Для объединения схем, состоящих из нескольких страниц, используются специальные соединители (off-page connector). Соединение двух проводников обозна-

чают точкой (junction). Для иерархических схем используются порты (port).

Кроме элементов схемы и их соединений на листе может присутствовать поясняющий текст (text) и вспомогательная графика, состоящая из прямых (line) и ломаных (polyline) линий, прямоугольников (rectangle), эллипсов (ellipse) и дуг (arc).

Для графических элементов можно задавать стиль и цвет образующих их линий аналогично тому, как это делалось в редакторе символов и компонентов.

Прежде чем приступить к редактированию схемы, рассмотрим организацию.

4.2. Многооконный интерфейс редактора Capture

В редакторе Capture можно выделить три типа окон (рис. 2.6).

1. Окно менеджера проекта (**Project manager**), которое имеет две вкладки: файл (**File**) и иерархия (**hierarchy**).

Для простых проектов вкладка иерархия малоинформативная, поскольку содержит ссылку на одну схему. Во вкладке файл можно посмотреть ресурсы проекта (**Design Resources**), в которые входят схема и библиотеки, выходные данные и ресурсы **PSpice**. Папка схемы содержит две вложенные папки: SCHEMATIC1 и Design Cache.

Первой созданной странице схемы по умолчанию присваивается



Рис. 2.6. Интерфейс редактора Capture

имя PAGE1 в папке SCHEMATIC1.

В папке SCHEMATIC1 находятся страницы схемы PAGE1 и т.д. Если открыть PAGE1, появится окно редактора схем.

2. Окно редактора схем предназначено для создания и редактирования схем проекта. Слева от окна редактора, когда редактор активен, расположена панель инструментов.

3. Окно текстового редактора предназначено для редактирования и просмотра текстовых файлов. В нем отображается Session log, который также можно открыть из меню Window.

В новом проекте схема по умолчанию называется SCHEMATIC1, и содержит одну страницу с именем PAGE1. С помощью менеджера проекта можно изменить название схемы и ее страниц.

4.3. Размещение компонентов схемы

Для размещения компонента на поле чертежа схемы служит команда **Place Part.** Данная команда вводится одним из нижеперечисленных способов:

- выбором команды Part в меню Place;

- кнопкой панели инструментов «Place Part»;

- сочетанием клавиш Shift + P.

При этом появится окно выбора компонента (Place Part) (рис. 2.7).

Выход из режима размещения элемента производится одним из нижеперечисленных способов:

– в контекстном меню выбрать команду **End Mode**;

- выбрать другой инструмент;

- нажать Shift + Е или Esc.

Чтобы поместить компонент на лист, нужно указать его имя в окошке **Part** окна **Place Part** и нажать «Enter».

Название компонента можно ввести в окно **Part** или выбрать из списка **Part List**. Если компонент в библиотеках, перечисленных в окошке **Libraries**, найден, его сим-



Рис. 2.7. Окно выбора компонента

волическое изображение отображается окне. Если не найден, его символическое изображение отсутствует.

Наиболее часто используемыми библиотеками являются:

- source.slb - библиотека источников;

- analog.slb – библиотека пассивных элементов.

В случае необходимости осуществляется поиск компонента в библиотеках, и библиотека его содержащая включается в список **Libraries**. Для поиска компонента служит кнопка **Search for Part** (см. рис. 2.7).

При поиске в поле **Part Name** вводится имя компонента. Допускается использование шаблонов, при этом знак «?» заменяет один символ, а «*» любое количество символов. Недостающая библиотека добавляется в список с помощью кнопки **Add Library** (доступна после нажатия кнопки **Search for part**). Ненужные библиотеки удаляются кнопкой **Remove Library**.

Основными действиями с изображением компонента на чертеже схемы являются (осуществляются с помощью контекстного меню, которое появляется по щелчку правой кнопки мыши, или при нажатии на клавиш):

– поворот (клавиша R)

– зеркальное отображение по вертикали (клавиша V) и горизонтали (клавиша H).

4.4. Соединение компонентов схемы

Режим размещения проводников включается одним из нижеперечисленных способов:

- кнопкой панели инструментов Place Wire;

- выбором меню Place/Wire;

- с помощью комбинации клавиш Shift + W.

Начало проводника отмечают щелчком левой кнопки мыши, переводят указатель в конечную точку или точку перегиба и также отмечают его щелчком мыши. Выходят из режима размещения проводников аналогично тому, как выходят из режима размещения компонентов.

Если нужно отметить места соединения проводников (обычно точка соединения устанавливается автоматически), пользуются инструментом **Place Junction** или **Shift + J**.

Для размещения на схеме общих точек на панели инструментов предусмотрена кнопка **Place Ground** (или **Shift** + **G**).

Аналогично общему проводу размещаются символы питающих напряжений: кнопка панели инструментов **Place Power**, меню **Place Power** или при помощи сочетания клавиш **Shift** + **F**.

Для создания шины, используют: команду меню Place/ Bus, кнопку Place Bus или сочетание клавиш Shift + В. Проводники подсоединяют к шинам с помощью отводов кнопкой Bus Entry (меню Place -> Bus Entry или Shift + E).

Для лучшей читаемости схемы и правильного соединения цепей при подсоединении проводника к шине цепи рекомендуется именовать, используя средства размещения псевдонимов цепи Net Alias (меню Place/ Net Alias или Shift + N).

5. Моделирование в PSpice

5.1. Средства моделирования

Моделирование в PSpice состоит из следующих этапов:

- определение переменных для визуализации;

- формирование задания на моделирование («профиля»);

– расчет и просмотр результатов моделирования.

Панель моделирования PSpice, предназначенная для ввода команд, реализующих данные этапы, представлена на рис. 2.8.

5.2. Определение точек визуализации результатов расчетов

Наблюдаемые переменные, для которых осуществляется вывод



Рис. 2.8. Панель и основные команды моделирования

результатов моделирования, обозначаются с помощью маркеров (см. рис. 2.8). Для этого маркер нужно «прислонить» к проводнику, выводу компонента либо компоненту.

Наблюдаться могут:

– напряжение относительно базового узла (маркер Voltage/Level Marker подключается к линии связи);

– разность потенциалов (маркер Voltage Differential Marker подключается к двум линиям связи);

- ток (маркер Current Marker подключается к выводу элемента);

– мощность (маркер Power Dissipation Marker подключается к компоненту).

Переменные могут визуализироваться на графике (рис. 2.9) либо непосредственно на схеме.



Рис. 2.9. Графики результатов моделирования во временной области

5.3. Расчет и формирование профиля моделирования

При создании проекта типа Analog or Mixed A/D автоматически создается профиль моделирования («профайл») с именем **Bias**, настроенный для расчета цепи по постоянному току. Можно перенастроить этот профиль или создать новый.

Для начала расчета служит команда Run PSpice (см. рис. 2.8).

Для создания нового профиля моделирования в меню **PSpice** выбирается команда **New simulation profile** (см. рис. 2.8). В окне создания нового профиля (рис. 2.10) указывается имя создаваемого профиля и имя профиля, на основе которого он создается.

lew Simulation	>
Name:	Create
Inherit From:	Cancel
none	
Root Schematic: SCHEMATIC1	

Рис. 2.10. Окно создания нового профиля моделирования

активный модуль можно с помощью команды **Make active**, доступной из контекстного меню и меню PSpice, или выбрав профиль (**Active Profile**) в окне панели моделирования (см. рис. 2.8). Если профиль один, он автоматически становится активным.

Окно настройки профиля (рис. 2.12) вызывается из меню PSpice\Edit simulation profile или с помощью кнопки Edit simulation profile.

Если профилей несколько, предварительно в окне менеджера проекта нужно выбрать тот, который будет настраиваться. Окно настройки профиля моделирования (см. рис. 2.12) имеет несколько закладок:

General – позволяет изменить имя профиля, задать имена и расположение файлов для записи выход-

ных данных, а также поместить текстовые комментарии;

Analysis – для выбора типа моделирования;

Include Files – для подключения и редактирования дополнительных файлов;

Libraries – для подключения и конфигурирования глобальных библиотек и библиотек проекта;

Stimulus – для конфигурирования глобальных источников тестового сигнала и источников проекта;

Все профили моделирования находятпапке PSpice СЯ В Resources \Simulation profiles менеджера проекта (рис. 2.11). Моделирование производится по активному профилю (отмечается буквой Р красного цвета). Выбрать



Рис. 2.11. Окно менеджера проекта

General Analysis Configuration	on Files Options Data Collection	tion Probe Window	
Analysis type: Time Domain (Transient)	Bun to time:	0.006 seconds (TSTOP)	
✓ General Settings ☐ Monte Carlo/Worst Case ☐ Parametric Sweep ☐ Temperature (Sweep) ☐ Save Bias Beist	Transient options <u>M</u> aximum step size:	seconds ent bias point calculation (SKIPBP)	
□ Save Blas Point □ Load Blas Point □ Save Check Points	🔲 <u>R</u> un in resume mode	e Output <u>File</u> Options.]

Рис. 2.12. Окно настроек профиля моделирования

Options – для тонкой настройки PSpice;

Data Collection – для определения данных, которые требуется сохранить;

Probe Window – для определения способа отображения окна результата моделирования.

6. Библиотеки моделей компонентов

Основными библиотеками программы PSpice являются:

- source - источники аналоговых и цифровых сигналов;

- analog - дискретные аналоговые компоненты (пассивные элементы);

- diode, jdiode диоды;
- **bipolar** биполярные транзисторы;
- pwrbjt мощные биполярные транзисторы;
- pwrmos мощные МОП транзисторы;
- jfet полевые транзисторы;
- thyristr тиристоры;
- opto оптоэлектронные пары;
- magnetic ферромагнитные сердечники.

Имеются библиотеки компонентов, выпускаемые отдельными фирмами.

На рис. 2.13 представлены основные модели источников напряжения САПР OrCAD.

Имя	Символ	Назначение	
IAC	1Aac H 11 DAdc H	Источник переменного тока	
VAC		Источник переменного напряжения	
IDC	0Adc	Источник постоянного тока	
VDC	0V410	Источник постоянного напряжения	
IPULS	- C-	Импульсный источник тока	
VPULS	-S	Импульсный источник напряжения	
ISIN	IOFF = IAMPL= FREG =	Источник синусондального ток	
VSIN	VOFF = VAMPL = FREG =	Источник синусоидального напряжения	
ISRC	$DC = \bigcup_{\substack{\lambda C = \\ TRAN = }}^{I5}$	Источник тока общего назначения	
VSRC	DC =	Источник напряжения общего назначения	

Рис. 2.13. Модели источников в САПР OrCAD

Для работы с моделями служит программа **Model Editor**. С ее помощью можно посмотреть перечень, назначение и числовые значения параметров элементов.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику состава пакета OrCAD.

2. Назовите основные этапы создания проектов в OrCAD Capture.

3. Какие типы проектов предусмотрены в OrCAD? Дайте общую характеристику их назначения.

4. Перечислите способы визуализации результатов моделирования.

5. Как осуществляется задание параметров моделирования?

6. Какие режимы анализа можно реализовать в САПР OrCAD?

7. Перечислите параметры моделирования при анализе во временной области.

8. Перечислите параметры моделирования при анализе в частотной области.

9. Назовите основные библиотеки моделей компонентов.

10. Перечислите параметры модели источника переменного напряжения.

11. Перечислите параметры модели диода.

12. Перечислите параметры модели биполярного транзистора.

13. Приведите эквивалентную модель диода.

13. Приведите эквивалентную модель биполярного транзистора.

Формирование оценки

N⁰	Этап задания	Оценка,
п/п		баллы
1	Задание п. 1	5
2	Задание п. 2	2
3	Задание п. 3	3
	Итого	10

Литература

1. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 200 с. – (Серия «Библиотека студента»).

2. Кузнецова С.А., Нестеренко А.В., Афанасьев А.О. OrCAD 10. Проектирование печатных плат /. – М. : Горячая линия-Телеком, 2005. – 454 с. – (Современная электроника).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТНО-УЗЛОВОЙ БАЗЫ В СИСТЕМАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы. Исследовать способы создания моделей и библиотек пользователя в системах MATLAB/Simulink и OrCAD.

Программа работы

1. Создать эквивалентную модель устройства с использованием технологии создания подсистем (маскирования) [1, С. 304].

Выполняется на примере моделирования устройств, заданных в табл. 3.1, согласно номеру варианта, полученного у преподавателя. Допускается использование собственных схем и моделей.

1.1. Разработать концепцию эквивалентной модели устройства с использованием технологии создания подсистем и маскирования. При реализации использовать модели базовых элементов Matlab/Simulink – диодов, RLC-цепи, источников сигналов, логических операций.

1.2. Разработать план вычислительного эксперимента для тестирования модели устройства.

1.3. Реализовать эквивалентную модель устройства с использованием технологии создания подсистем и маскирования [1, С. 304].

1.4. Выполнить тестирование модели, сделать выводы о корректности и адекватности модели. При необходимости произвести корректировку и отладку модели.

1.5. Создать новую библиотеку пользователя [1, С. 352] и поместить в нее разработанную модель.

1.6. Сформировать отчет о проделанной работе, в котором представить:

– эквивалентную модель устройства и библиотеку пользователя;

– окно параметров модели, подтверждающее выполнение требований к параметрам;

- тестовую схему для проверки корректности модели;

Таблица 3.1

Варианты заданий для разработки моделей с использованием подсистем

№ вари анта	Объект моделирования		Требования к параметрам модели
1	Сидорая насть однофаа		
1	Силовая часть однофаз	HOLO MOCTOBOLO	парамстры полупро-
	выпрямитсля		OTVIDUTOM U 22VIDUTOM
			состояниях
2	Схема управления регул	ируемым одно-	Угол управления
	фазным выпрямителем с	нулевой точкой	
3	Схема управления регул	ируемым одно-	Угол управления
	фазным мостовым выпря	мителем	
4	Силовая часть однофаз	ного инвертора	Параметры полупро-
	напряжения с трансформ	иаторным выхо-	водниковых вентилей в
	дом		открытом и закрытом
			состояниях
5	Схема управления одноф	азным инверто-	Частота напряжения
	ром напряжения		
6	Силовая часть трехфази напряжения	ного инвертора	Частота напряжения
7	Трехфазный источник на	апряжения с за-	Внутреннее сопротив-
	данным внутренним сопр	отивлением фа-	ление фазы
	ЗЫ	-	-
8	Силовая часть импульс-	понижающего	Параметры реактивных
	ного преобразователя		элементов фильтра
9	непосредственного типа	повышающего	Параметры реактивных
	без гальванической раз-		элементов фильтра
10	вязки входной и выход-	полярноинвер-	Параметры реактивных
	ной цепей	тирующего	элементов фильтра
11	LCD-фильтр импульсног	го преобразова-	Параметры реактивных
	теля		элементов фильтра
12	Плечо инвертора		Параметры полупро-
			водниковых ключей в
			открытом и закрытом
			состояниях
13	Технологический процесс	лиффузии	Температура

– результаты тестирования и выводы о корректности и адекватности модели.

2. Получить навыки создания моделей для функционального моделирования с использованием функций пользователя S-функций [1, C. 244].

Выполняется на примерах создания моделей S-функций [1, C. 244] для функциональных зависимостей, указанных в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Вариант	Функция
1	$f(x) = -x_1^2 - 4x_2^2 + 2x_1x_2 + x_1$
2	$f(x) = -x_1^2 + x_1\sqrt{x_2} - x_2 + 6x_1 + 10$
3	$f(x) = x_1^2 - 2x_2^2 - 2x_1x_2 + x_1$
4	$f(x) = x_1^4 + x_2^4 - 2(x_1 - x_2)^2$
5	$f(x) = x_1 x_2 + \frac{20}{x_1} + \frac{50}{x_2}$
6	$f(x) = \exp\left(-x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 - x_2\right)$
7	$f(x) = \exp\left(-2x_1^2 - 5x_2^2 + x_1x_2\right)$
8	$f(x) = (4 - x_1)^2 + (x_1 - x_2)^2$
9	$f(x) = x_1^2 - x_2^2 + e^{-x_1^2}$
10	$f(x) = e^{-x_1^2 - x_2^2}$
11	$f(x) = \exp\left(x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 + 2\right)$
12	$f(x) = (x_1^3 - 1)^4 + (x_2 - 1)^2 - 2$
13	$f(x) = x_1 x_2^2 \left(1 - x_1 - x_2 \right)$
14	$f(x) = (x_1 + x_2 - 1) \exp(-x_1^2 - x_1 x_2 + x_2^2)$
15	$f(x) = (x_1 - 1)^3 + (x_2 - x_1)^2$
16	$f(x) = x_1^2 + 4x_2^3 - 2x_1x_2$

Исходные данные для реализации S-функций
2.1. Изучить методику создания моделей с использованием Sфункций и структуру шаблона S-функции sfuntmpl.m, который находится в папке ...\toolbox\simulink\blocks, а его копия – в папке с лабораторными работами по дисциплине

С использованием шаблона S-функций sfuntmpl.m (находится в папке ...\toolbox\simulink\blocks, копия – в папке с лабораторными работами по дисциплине) реализовать собственную модель компонента (блока) для расчета произвольной простой функции одной переменной (sin, cos, умножение на коэффициент и т.п.). В качестве образца рекомендуется использовать пример S-функции «timestwo», в которой реализовано умножение входной переменной на два. Произвести тестирование разработанного блока.

2.2. Создать модель блока согласно варианту задания (табл. 3.2).

2.3. Разработать план вычислительного эксперимента для тестирования модели блока. Реализовать тестирование и отладку блока. Отлаженную модель блока внести в библиотеку пользователя.

2.4. Сформировать отчет о проделанной работе, в котором представить:

- фрагменты текста программной реализации модели;

- тестовую схему для проверки корректности модели;

- результаты тестирования и выводы о корректности модели;

- копию окна библиотеки с двумя разработанными моделями.

3. Получить навыки создания пользовательских моделей элементов в САПР OrCAD.

3.1. Изучить создания пользовательских моделей элементов в САПР OrCAD [2].

3.2. Реализовать и протестировать модель согласно варианту задания из табл. 3.1.

3.3. Сформировать отчет о проделанной работе, в котором представить:

- описание способов создания моделей в OrCAD;

– реализацию модели и результаты ее тестирования.

Краткие сведения из теории

Актуальность знания способов реализации моделей

Набор стандартных элементов подсистем моделирования САПР позволяет решать широкий класс задач исследования устройств и систем, однако в практике моделирования встречаются ситуации, когда модели нужного элемента нет. Это часто возникает на этапе проведения научно-исследовательских работ, когда исследуются новый объект, процесс или явление, создаются их математические описания, предполагается дальнейшее использование модели в рамках САПР, в том числе для проверки корректности и адекватности модели в различных режимах в составе устройств и систем, в которые одна входит.

Знание способов представления и реализации моделей в САПР также важен для понимания процесса моделирования, его возможностей и особенностей.

Способы представления и реализации моделей

Как известно, математической моделью объекта называется любое формализованное (записанное с помощью математических, т.е. условных однозначно трактуемых символов) описание, отражающее состояние или поведение объекта с требуемой степенью точности.

В зависимости от степени детализации моделируемого объекта математические модели могут иметь различные исходные способы представления.

По способу представления модели элементов подразделяются на:

– аналитические (например, компонентные уравнения элементов электрических цепей);

– алгоритмические (алгоритм работы системы управления);

- табличные (таблицы истинности логических элементов);

 – графические (вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов, механические характеристики двигателей);

– эквивалентные в виде схем замещения (схема замещения диода, транзистора).

Для реализации в системах моделирования исходные модели проходят этап преобразования к принятым в этих системах формам представления. Основными формами реализации моделей элементов в системах моделирования являются схемы замещения и алгоритмические модели.

Разработка моделей элементов в Matlab/Simulink с помощью технологии подсистем

Если исходная модель нового элемента задана в виде схемы, то для ее реализации в системе моделирования удобно использовать технологию подсистем (маскирования) [1, С. 304].

Основными этапами разработки модели являются:

- создание подсистемы;
- назначение портов ввода и вывода, т.е. связей компонента;
- задание параметров блока;
- тестирование и запись в библиотеку.

Для создания подсистемы группа блоков выделяется мышью, после чего выполняется команда меню Edit/ Create Subsystem. После этого на месте выделенных блоков появится блок подсистемы. Для этой операции недоступна команда Undo (отмена последней операции). Поэтому перед выделением части модели в подсистему исходную модель рекомендуется сохранить.

Для просмотра и модификации подсистемы следует навести на нее курсор мыши и дважды щелкнуть левой кнопкой. Появится окно созданной подсистемы. При создании подсистемы автоматически появляются новые блоки – порт входа In и порт выхода Out. Порты изображаются овалами с номером внутри и подписями. Благодаря этим портам подсистема включается в состав основной модели. Порты входа и выхода могут переименовываться, может быть изменено их положение – слева или справа блока.

В качестве примера на рис. 3.1 представлена эквивалентная модель идеального источника ЭДС.

Разработка моделей с помощью S-функций в Matlab/Simulink

Если структурное моделирование делает эквивалентную модель слишком сложной, то для создания нужного блока можно использо-



Рис. 3.1. Эквивалентная модель идеального источника ЭДС для схемотехнического моделирования

вать технологию S-функций. Однако, в этом случае приходится использовать технологию программирования модели.

С помощью языков программирования пользователь может создать описание сколь угодно сложного блока и подключить его к Simulink-модели, при этом с точки зрения взаимодействия пользователя с моделью, блок на основе S-функции ничем не отличается от стандартного библиотечного блока Simulink. Создаваемые блоки могут быть непрерывными, дискретными или гибридными. S-функции, созданные на C, C++, Ada или Fortran компилируются в исполняемые (*.dll) файлы, за счет чего обеспечивается повышенная скорость выполнения таких блоков. Такие S-функции обладают еще и дополнительными возможностями, которые включают работу с разными типами данных (целыми, действительными и комплексными числами различной степени точности), использование матриц в качестве входных и выходных переменных (MATLAB S-функции могут оперировать только векторами в качестве входных и выходных переменных), а также больший набор внутренних функций (callback-методов).

Чаще всего S-функции используются при создании новых библиотечных блоков, блоков, обеспечивающих взаимодействие Simulink с аппаратными средствами компьютера, при создании блоков на основе математических уравнений, блоков реализующих анимационные возможности MATLAB, а также при подключении к модели Simulink существующего программного кода языков высокого уровня.

Simulink-блок однозначно описывается тремя наборами переменных:

- набор **входных переменных** *и*;

- набор **переменных состояния** *х*;

- набор выходных переменных у (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Переменные модели блока S-функции

Математическая модель блока S-функции имеет вид:

 $y = f_0(t, x, u)$ (выходы)

 $\dot{X}_{C} = f_{d}(t, x, u)$ (производные непрерывных переменных состояния)

 $x_{d_{k+1}} = f_{U}(t, x, u)$ (дискретные переменные состояния)

где $x = x_c + x_d$

Каждая задача при вызове S-функции в процессе моделирования решается с помощью специальной внутренней функцией (callback-метода). В S-функции используются следующие методы:

mdlInitializesizes – инициализация; до начала первого цикла моделирования Simulink инициализирует S-функцию, т.е. на этом этапе Simulink: инициализирует структуру с именем SimStruct, содержащую информацию о S-функции; устанавливает количество и размерность входных и выходных портов; устанавливает шаг модельного времени для блока; выделяет память для хранения переменных и устанавливает размерность массивов;

mdlGetTimeOfNextVarHit – вычисление времени следующего срабатывания блока (для блоков с дискретным переменным шагом расчета);

mdlOutputs – вычисление значений выходных сигналов на внешнем шаге моделирования; на этом этапе рассчитанные выходные сигналы блока передаются на его выходные порты;

mdlUpdate – расчет дискретных переменных состояния на внешнем шаге моделирования; дискретные переменные состояния сохраняют свое значение до следующего цикла моделирования;

mdlDerivatives – расчет производных переменных состояния;

mdlTerminate – завершение работы S-функции.

Если S-функция содержит непрерывные переменные состояния, Simulink вызывает callback-методы mdlDerivatives и mdlOutputs для расчета производных переменных состояния и выходных переменных на внутренних шагах моделирования.

Вызов каждого из методов Simulink задает с помощью переменной flag, являющейся входным параметром S-функции.

Ниже представлена структура шаблона S-функции и приведен пример простой S-функции для исходной модели непрерывного типа.

Структура шаблона S-функции

```
function [sys,x0,str,ts] = sfuntmpl(t,x,u,flag)
응
% SFUNTMPL - Базовый шаблон для создания MATLAB S-функции.
  С помощью МАТLAB S-функции пользователь может задать систему
응
  обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДЕ), уравнения дискретной
응
   системы, и (или) любой алгоритм, описывающий работу Simulink-блока.
응
응
응
   Базовая форма синтаксиса S-функции выглядит следующим образом:
응
        [sys,x0,str,ts] = sfunc(t,x,u,flag,p1,...,pn)
응
응
      Параметры S-функции:
응
       - Текущее время
8 t
8 x
       - Вектор переменных состояния системы
      - Вектор входных сигналов
응
  u
  flag - Флаг - целое число, определяющее какая функция внутри S-функции
응
응
         выполняется при вызове.
% p1,...,pn - Параметры S-функции, задаваемые в окне диалога
응
              блока "S-function".
응
   Результат, возвращаемый (вычисляемый) S-функцией в момент времени t
응
   зависит от значения переменной flag, значения вектора состояния сис-
응
темы 🗙
   и текущего значения вектора входного сигнала и.
응
응
    Результаты работы S-функции в зависимости от значения переменной flag
응
% приведены в таблице:
```

```
응
```

8				
응	flag	РЕЗУЛЬТАТ	ВЫПОЛНяЕМАя ФУНКЦИя	ОПИСАНИЕ
8			(callback-метод)	
8				
8	0	[sizes,x0,	mdlInitializesizes	Инициализация: Расчет
8		str,ts]		начальных условий, значе
8				ний вектора модельного
응				времени, размерности мат-
응				риц.
응	1	dx	mdlDerivatives	Расчет значений производ-
8				ныхвектора х состояния
8				СИСТЕМЫ.
8	2	ds	mdlUpdate	Расчет значений вектора
8				состояний х дискретной
8				системы: sys = x (n +1).
8	3	У	mdlOutputs	Расчет значений выходно
8				го вектора sys .
8	4	tnext	mdlGetTimeOfNextVarHit	Расчет значения времени
8				для следующей расчетной
8				точки дискретной части
8				системы.
8				Используется при расчете
8				дискретной или гибридной
8				системы с переменным ша-
8				FOM.
8	5			Зарезервировано для буду-

41

응 | шего 응 использования. 9 응 [] mdlTerminate |Завершение расчета 응 S 응 Параметры блока "S-function" p1,..., pn передаются в S-функцию при 응 응 любом значении переменной **flag**. 응 응 При вызове S-функции со значением переменной **flag = 0** ею рассчитыва ются следующие величины: 응 응 % sys(1) - Число непрерывных переменных состояния. % sys(2) - Число дискретных переменных состояния. % sys(3) - Число выходных переменных. % sys(4) - Число входных переменных (размерность вектора u). ŝ Любой из первых четырех элементов в **sys** может быть задан равным -1 (минус один), что означает динамически задаваемую 응 응 размерность соответствующих переменных. Фактическая размер 응 ность при вызове **S-функции** с другими значениями переменной **flag** 응 будет равна размерности входного вектора и. 응 ŝ Например, при **sys(3) = -1**, размерность выходного вектора будет задана равной размерности входного вектора. ŝ % sys(5) - Значение зарезервировано для будущего использования. sys(6) - Значение, равное 1, соответствует прохождению входного сигнала 응 на выход. Значение, равное 0, определяет, что входной сигнал 응 응 не используется для вычисления выходного сигнала в функции mdlOutputs, вызываемой при значении переменной flag = 3. 응 sys(7) - Размерность вектора модельного времени (количество строк в 응 응 матрице **ts**). 응응 8 x0 - Задание вектора начальных значений переменных состояния. 응 Если переменных состояния нет - значение параметра задается равным [] . 응 - Зарезервированный параметр. Значение параметра задается 응 str 응 равным [] . 응 응 - Матрица, размерностью **m**-на-2, задающая модельное время ts 응 и смещение (period и offset), где m - число строк в матрице 응 ts. Hanpumep: 응 % Шаг модельного времени для непрерывной 응 ts = [0]0, % % части системы. 응 0 1, % Фиксированный шаг расчета для непрерывной % части системы. S period offset, % Фиксированный шаг модельного времени для 응 % дискретной части системы, 응 % где - period > 0 & offset < PERIOD. 응 -2 0]; % Переменный шаг модельного времени для дискретной части системы. При вызове S S-функции со значением переменной flag = 4 응 응 выполняется расчет следующей точки по времени. S 응 Если в матрице ts заданы несколько значений шага модельного 응 времени, то его значения должны располагаться в порядке возрастания. В том случае, если задано более одного значения шага требуется про 응

```
응
    верка времени срабатывания блока в явном виде:
응
      abs(round((T-OFFSET)/PERIOD) - (T-OFFSET)/PERIOD)
응
    Обычно задаваемая погрешность при проверке равна 1е-8. Она зависит
응
    от величин шага модельного времени и времени окончания расчета.
    Можно также задать, чтобы значение временного шага передавалось в
응
응
    блок "S-function" из предшествующего блока модели. Для функций,
응
    изменяющихся внутри основного временного шага должно быть задано
응
    sys(7) = 1 M ts = [-1 0].
      Для функций, не изменяющихся внутри основного временного шага
응
응
    должно быть задано sys(7) = 1 и ts = [-1 1] .
응
   Copyright 1990-2001 The MathWorks, Inc.
응
   $Revision: 1.17 $
응
응
   Авторский перевод комментариев: Черных И.В.
<del></del>
응
   Нижележащие строки показывают базовую структуру S-функции:
ŝ
switch flag, % В зависимости от значения переменной flag происходит
          % вызов того или иного метода::
%======%
% Инициализация %
%======%
 case 0,
   [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
%=======%
% Расчет производных %
%======%
 case 1,
   sys=mdlDerivatives(t,x,u);
%_____
🖇 Расчет значений вектора состояний дискретной части системы 将
case 2,
   sys=mdlUpdate(t,x,u);
🞖 Расчет значений вектора выходных сигналов непрерывной части системы 🗞
case 3,
   sys=mdlOutputs(t,x,u);
% Расчет значения времени для следующей расчетной точки дискретной %
% части системы
                                                   0
case 4,
   sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
%========%
% Завершение расчета %
%=========%
 case 9,
   sys=mdlTerminate(t,x,u);
%===============%
```

```
% Неизвестное значение переменной flag %
%=============%
 otherwise
   error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
% Окончание функции sfuntmpl
% mdlInitializeSizes
                                                            00
% Функция инициализации
                                                            2
🖇 Расчет начальных условий, значений вектора модельного времени,8
% размерности матриц
                                                           2
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
% Приведенные ниже значения параметров даны в качестве примера и не отра-
жают реально задаваемых значений.
sizes = simsizes; % Первый вызов функции simsizes создает структуру sizes
sizes.NumContStates = 0; % Число непрерывных переменных состояния
sizes.NumDiscStates = 0; % Число дискретных переменных состояния
                  = 0; % Число выходных переменных (размерность выход-
sizes.NumOutputs
ного
                        8 вектора)
                   = 0; % Число входных переменных (размерность
sizes.NumInputs
                        % вектора u)
sizes.DirFeedthrough = 1; % Параметр, задающий проход входного сигнала на
                        8 выход.
                        % Этот параметр нужно задавать равным 1, в том
                        % случае, если входной сигнал прямо или
                        % опосредованно (например, через логическое
                        % выражение или алгебраическую операцию)
                        % проходит на выход системы (иными словами:
                        % если входной сигнал u, входит в выражения
                        % задаваемые в функции mdlOutputs) или
                        % используется метод mdlGetTimeOfNextVarHit.
                        % При описании системы в уравнениях пространст
                        % ва состояний этот параметр следует задать
                        % равным 1, если матрица D (матрица обхода)
                        % не пустая и равным нулю, в противном случае.
sizes.NumSampleTimes = 1; % Размерность вектора модельного времени.
                        % Минимальное значение параметра = 1
                        % (одна строка в матрице ts).
sys = simsizes(sizes);
                        % Второй вызов функции simsizes. Данные о
                        % размерностях передаются в Simulink.
            8 Задание вектора начальных значений переменных состояния
x0 = [];
            % (начальных условий).
str = [];
            % Задание параметра str, как пустой матрицы. Параметр
            % заразервирован для будущего использования.
ts = [0 0]; % Матрица из двух колонок, задающая шаг модельного времени
            % и смещение.
% Окончание mdlInitializeSizes
```

44

```
% mdlDerivatives
2
% Функция для расчета значений производных вектора состояния непрерывной
8 части системы
0
2
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
sys = [];
% Окончание mdlDerivatives
% % mdlUpdate %
% Функция для расчета значений вектора выходных сигналов непрерывной час-
ти % % системы %
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
% Окончание mdlUpdate
%_____%
% mdlOutputs
                                                 00
% Функция для расчета значений вектора выходных сигналов непрерывной час%
8 ти системы
                                                 8
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
sys = [];
% Окончание mdlOutputs
% mdlGetTimeOfNextVarHit
                                                 8
% Расчет значения времени для следующей расчетной точки дискретной части%
% системы.
% Функция рассчитывает время (абсолютное значение), по достижении которо%
🖇 го значения дискретной части системы передаютсяв Simulink-модель. 🛛 🗞
% Функция используется только в случае моделирования дискретной части
                                                 9
8 системы с переменным шагом (variable discrete-time sample time).В этом%
🖇 случае параметр ts функции mdlInitializeSizes должен быть задан как 🛛 🗞
8 [-2 0]
                                                 00
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1; % Пример: время срабатывания блока увеличивается
           % на 1 секунду.
sys = t + sampleTime;
% Окончание mdlGetTimeOfNextVarHit
%==============%
% mdlTerminate
                             90
🖇 Функция, выполняющая завершение расчета 🖇
%===============%
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
```

sys = [];% Окончание mdlTerminate

Пример S-функции

Одним из самых простых примеров S-функций поставляемых с пакетом Matlab/Simulink является функция timestwo (файл timestwo.m). Данная S-функция выполняет умножение входного непрерывного сигнала на коэффициент 2, т.е. в принятой в Matlab/Simulink нотации переменных блока S-функции (см. рис. 3.2) модель компонента имеет вид:

$$y = u * 2.$$

Ниже приведен текст этой S-функции.

```
function [sys,x0,str,ts] = timestwo(t,x,u,flag)
9
   ТІМЕSTWO - Пример S-функции. Выходной сигнал равен входному,
9
9
   умноженному на 2:
9
     y = 2 * u;
90
   Шаблон для создания S-функции - файл sfuntmpl.m .
90
9
   Copyright 1990-2001 The MathWorks, Inc.
90
90
   $Revision: 1.6 $
90
   Авторский перевод комментариев: Черных И.В.
8
switch flag, % В зависимости от значения переменной flag происходит
          % вызов того или иного метода:
%=================%
% Инициализация %
8============8
 case 0
   [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
% Расчет значений вектора выходных сигналов %
case 3
   sys=mdlOutputs(t,x,u);
% Неиспользуемые значения переменной flag %
% В примере не используются методы для завершения работы S-функции,
 % нет непрерывных и дискретных переменных состояния,
 % поэтому значения переменной flag = 1, 2, 4, 9 не используются.
 % Результатом S-функции в этом случае является пустая матрица.
 case { 1, 2, 4, 9 }
   sys=[];
```

```
% Неизвестное значение переменной flag %
otherwise
   error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
% Окончание функции timestwo
8_____8
% mdlInitializeSizes
                                                     00
% Функция инициализации
                                                     8
🖇 Расчет начальных условий, значений вектора шагов модельного 🖇
% времени, размерности матриц
%____%
0
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0; % Число непрерывных переменных состояния.
sizes.NumDiscStates = 0; % Число дискретных переменных состояния.
                = -1; % Число выходных переменных (размерность
sizes.NumOutputs
                       % выходного вектора).
                       % Динамическая размерность выходного вектора.
sizes.NumInputs
                  = -1; % Число входных переменных (размерность вход
                       % ного вектора).
                       % Динамическая размерность входного вектора.
sizes.DirFeedthrough = 1; % Прямой проход. Есть проход входного сигнала
                       % на выход.
sizes.NumSampleTimes = 1; % Размерность вектора шагов модельного
                       % времени.
sys = simsizes(sizes);
                       % Параметр заразервирован для будущего
str = [];
                       % использования.
x0 = [];
                       % Задание вектора начальных значений перемен
                       % ных состояния.
                       % Переменных сомтояния нет, поэтому значение
                       % параметра - пустая матрица.
ts = [-1 \ 0];
                       % Матрица из двух колонок, задающая шаг
                       % модельного времени и смещение.
                       % Шаг наследуется из предшествуюшего блока.
% Окончание mdlInitializeSizes
00
%____%
                                                 2
% mdlOutputs
🖇 Функция для расчета значений вектора выходных сигналов 🗞
2
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
sys = u * 2; % Выходной сигнал блока есть входной сигнал, умноженный на
           % коэффициент 2.
```

47

% Окончание mdlOutputs

Тестовая схема для исследования модели S-функции «timestwo» приведена на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Тестовая схема для исследования модели блока «timestwo»

Формирование балльной оценки

N⁰	Этап задания	Оценка,
п/п		баллы
1	Задание п. 1	3
2	Задание п. 2	3
3	Задание п. 3	3
4	Оформление отчета	1
	Итого	10

Литература

1. Дьяконов В. П Simulink 5/6/7 : Самоучитель. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 781 с.

2. Электронный учебник по OrCAD 9.1. (Папака S:\Методы математического моделирования\Литература).

Контрольные вопросы

1. Назовите способы представления моделей элементов.

2. Назовите способы создания моделей элементов в Matlab/ Simulink и OrCAD.

3. Перечислите основные этапы создания эквивалентных моделей в Matlab/ Simulink и OrCAD.

4. Перечислите основные этапы создания моделей в виде Sфункций Matlab/ Simulink.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Цель работы. Исследовать методы определения параметров динамических моделей на основании экспериментальных данных.

Программа работы

1. Изучить метод идентификации и решить задачу идентификации модели для тестового примера.

2. Решить задачу идентификации модели согласно индивидуальному варианту задания.

3. Протестировать модель, полученную в п. 2 (например, путем моделирования в Matlab/Simulink), проверив ее адекватность путем сравнения с экспериментальными данными.

Краткие сведения из теории

Актуальность знания способов реализации моделей

При моделировании электронных устройств и систем, при разработке систем управления встречаются ситуации, когда математическая модель элемента, процесса, устройства отсутствует либо не определены ее параметры. В этой связи задача определения вида и параметров математической модели является актуальной.

Для решения данных вопросов используются методы планирования эксперимента и идентификации моделей. В настоящей лабораторной работе исследуется метод идентификации стационарной модели динамической системы.

Постановка задачи идентификации

Рассматривая примеры идентификации параметров стационарных систем методами максимального правдоподобия, последовательной регрессии, стохастической аппроксимации и последовательного обучения, мы будем исходить из того, что моделируемый объект может быть описан системой двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами. В качестве независимой переменной рассматривается время t. Задача формулируется следующим образом. По результатам измерений входного сигнала $\vec{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$ на интервале изменения независимой переменной (времени) $t \in [t_0, T]$ и компонент вектора переменных состояния $x_1(t)$, $x_2(t)$ идентифицировать систему (найти ее параметры), которая в соответствии с принятой гипотезой описывается системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами. Примем, что уравнения, представляющие собой математическое выражение априорно принятой гипотезы о внутреннем устройстве реальной системы, имеют вид

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t) \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + b_{11}u_1(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + b_{22}u_2(t), \ t \in [t_0, T]. \end{cases}$$
(1.1)

Эта запись является результатом первого этапа исследований, на котором экспериментатор в итоге предварительных наблюдений за реальной системой:

1) оценил количество входов (два в этом случае) и принял, что входное воздействие описывается измеряемой функцией $\vec{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\};$

2) оценил количество измеряемых переменных состояния (две в этом случае), для которых принял обозначения $x_1(t)$, $x_2(t)$ соответственно;

3) принял предположение о том, что система стационарна, т.е. внутренние параметры (коэффициенты в системе уравнений) не изменяются, по крайней мере, в течение времени идентификации $T - t_0$;

4) принял допущение, что изучаемая система (устройство) может быть описана системой двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами.

Результатом этого предварительного этапа и является математическое оформление гипотезы в виде уравнений (1.1).

Экспериментальное исследование объекта

Следующий этап изучения некоторой реальной системы — измерения, постановка опыта. В нашем примере предполагается, что выполнены измерения непосредственно компонент $x_1(t)$, $x_2(t)$ вектора переменных состояния и входного сигнала $\vec{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$ в дискретном наборе равноотстоящих узлов на оси времени, т. е. с постоянным шагом по времени $\Delta t = \frac{T - t_0}{N - 1} = 0,1$ с. Результаты измерений зафиксированы в виде табл. 1.1.

Таблица 1.1

k	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	<i>u</i> ₂ (<i>t</i>)
1	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00	0.1000E+01	0.1000E+01
2	0.1000E+00	0.1010E+01	0.1105E+00	0.1105E+01	0.1105E+01
3	0.2000E+00	0.1042E+01	0.2443E+00	0.1221E+01	0.1221E+01
4	0.3000E+00	0.1096E+01	0.4050E+00	0.1350E+01	0.1350E+01
5	0.4000E+00	0.1174E+01	0.5967E+00	0.1492E+01	0.1492E+01
6	0.5000E+00	0.1279E+01	0.8244E+00	0.1649E+01	0.1649E+01
7	0.6000E+00	0.1414E+01	0.1093E+01	0.1822E+01	0.1822E+01
8	0.7000E+00	0.1581E+01	0.1410E+01	0.2014E+01	0.2014E+01
9	0.8000E+00	0.1784E+01	0.1780E+01	0.2226E+01	0.2226E+01
10	0.9000E+00	0.2027E+01	0.2214E+01	0.2460E+01	0.2460E+01
11	0.1000E+01	0.2315E+01	0.2718E+01	0.2718E+01	0.2718E+01
12	0.1100E+01	0.2653E+01	0.3305E+01	0.3004E+01	0.3004E+01
13	0.1200E+01	0.3048E+01	0.3984E+01	0.3320E+01	0.3320E+01
14	0.1300E+01	0.3507E+01	0.4770E+01	0.3669E+01	0.3669E+01
15	0.1400E+01	0.4037E+01	0.5677E+01	0.4055E+01	0.4055E+01
16	0.1500E+01	0.4649E+01	0.6723E+01	0.4482E+01	0.4482E+01
17	0.1600E+01	0.5352E+01	0.7925E+01	0.4953E+01	0.4953E+01
18	0.1700E+01	0.6158E+01	0.9306E+01	0.5474E+01	0.5474E+01
19	0.1800E+01	0.7081E+01	0.1089E+02	0.6050E+01	0.6050E+01

k	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
20	0.1900E+01	0.8135E+01	0.1270E+02	0.6686E+01	0.6686E+01
21	0.2000E+01	0.9338E+01	0.1478E+02	0.7389E+01	0.7389E+01
22	0.2100E+01	0.1071E+02	0.1715E+02	0.8166E+01	0.8166E+01
23	0.2200E+01	0.1227E+02	0.1986E+02	0.9025E+01	0.9025E+01
24	0.2300E+01	0.1404E+02	0.2294E+02	0.9974E+01	0.9974E+01
25	0.2400E+01	0.1605E+02	0.2646E+02	0.1102E+02	0.1102E+02
26	0.2500E+01	0.1834E+02	0.3046E+02	0.1218E+02	0.1218E+02
27	0.2600E+01	0.2092E+02	0.3501E+02	0.1346E+02	0.1346E+02
28	0.2700E+01	0.2386E+02	0.4018E+02	0.1488E+02	0.1488E+02
29	0.2800E+01	0.2718E+02	0.4605E+02	0.1644E+02	0.1644E+02
30	0.2900E+01	0.3094E+02	0.5271E+02	0.1817E+02	0.1817E+02
31	0.3000E+01	0.3519E+02	0.6026E+02	0.2009E+02	0.2009E+02

Окончание табл.1.1

Математические основы идентификации – предварительные преобразования уравнений и исходных данных

Идентификация параметров системы (1.1) по результатам измерений может быть выполнена методами максимального правдоподобия, последовательной регрессии, стохастической аппроксимации и другими. Однако, прежде чем переходить к применению того или иного метода, требуется выполнить подготовительные действия, так как измерения имеют дискретный характер. Эти действия выполняются на третьем этапе идентификации.

В нашем примере требуется от уравнений непрерывной модели перейти к их дискретному аналогу. С этой целью в исходной системе уравнений (1.1) производные по времени заменяются их приближенными значениями, вычисляемыми по какой-либо формуле конечно-разностной аппроксимации. В простейшем случае, считая, что шаг по времени Δt достаточно мал, можно воспользоваться так называемой формулой «правосторонних» разностей

$$\frac{d\phi(t)}{dt}\Big|_{t_k} \approx \frac{\phi(t_k + \Delta t) - \phi(t_k)}{\Delta t} = \frac{\phi^{(k+1)} - \phi^{(k)}}{\Delta t}, \qquad (1.2)$$

где под $\phi^{(k)}$ подразумевается значение любой из функций $x_1(t)$, $x_2(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$, измеренное в момент времени $t^{(k)}$ (k = 1, 2, ... — номер момента времени). Для указания номера момента времени (он же номер измерения) далее будем использовать верхний индекс, заключенный в скобки, а нижние

индексы, как и ранее, будем использовать для указания номера компоненты вектора или элементов матриц.

Выполнив такой переход от непрерывной к дискретной модели системы, из уравнений (1.1) получим систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \frac{x_{1}^{(k+1)} - x_{1}^{(k)}}{\Delta t} = a_{11}x_{1}^{(k)} + a_{12}x_{2}^{(k)} + b_{11}u_{1}^{(k)}, \\ \frac{x_{2}^{(k+1)} - x_{2}^{(k)}}{\Delta t} = a_{21}x_{1}^{(k)} + a_{22}x_{2}^{(k)} + b_{22}u_{2}^{(k)}, \quad t^{(k)} \in [0,T]. \end{cases}$$

$$(1.3)$$

С этой системой выполним следующее преобразование: выразим значения функций $x_1^{(k+1)}$, $x_2^{(k+1)}$ для момента времени $t^{(k+1)}$ через их значения в предыдущий момент времени $t^{(k)}$. В результате из системы (1.3) получим уравнения

$$\begin{cases} x_1^{(k+1)} = (1 + a_{11}\Delta t)x_1^{(k)} + (a_{12}\Delta t)x_2^{(k)} + (b_{11}\Delta t)u_1^{(k)}, \\ x_2^{(k+1)} = (a_{21}\Delta t)x_1^{(k)} + (1 + a_{22}\Delta t)x_2^{(k)} + (b_{22}\Delta t)u_2^{(k)}, \ t^{(k)} \in [0,3]. \end{cases}$$
(1.4)

Начиная с этого момента, будем считать, что величины $x_1^{(k+1)}$, $x_2^{(k+1)}$ слева от знака равенства в системе (1.4) — это известные (измеренные) значения компонент вектора выходного сигнала, величины $x_1^{(k)}$, $x_2^{(k)}$, $u_1^{(k)}$, $u_2^{(k)}$ — известные (измеренные) значения компонент вектора входного сигнала, или, если использовать терминологию, принятую при описании метода максимального правдоподобия, значения базисных функций. Следуя этим представлениям, уравнения (1.4) запишем в виде двух систем уравнений, которые теперь можно рассматривать независимо:

$$\begin{cases} y_{1}^{(k)} = \theta_{11}f_{11}^{(k)} + \theta_{12}f_{12}^{(k)} + \theta_{13}f_{13}^{(k)}, \\ y_{1}^{(k)} = x_{1}^{(k+1)}, f_{11}^{(k)} = x_{1}^{(k)}, f_{12}^{(k)} = x_{2}^{(k)}, f_{13}^{(k)} = u_{1}^{(k)}, \\ \theta_{11} = 1 + a_{11}\Delta t, \theta_{12} = a_{12}\Delta t, \theta_{13} = b_{11}\Delta t, \\ a_{11} = (\theta_{11} - 1)/\Delta t, a_{12} = \theta_{12}/\Delta t, b_{11} = \theta_{13}/\Delta t; \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{2}^{(k)} = \theta_{21}f_{21}^{(k)} + \theta_{22}f_{22}^{(k)} + \theta_{23}f_{23}^{(k)}, \\ y_{2}^{(k)} = x_{2}^{(k+1)}, f_{21}^{(k)} = x_{1}^{(k)}, f_{22}^{(k)} = x_{2}^{(k)}, f_{23}^{(k)} = u_{2}^{(k)}, \\ \theta_{21} = a_{21}\Delta t, \theta_{22} = 1 + a_{22}\Delta t, \theta_{23} = b_{22}\Delta t, \\ a_{21} = \theta_{21}/\Delta t, a_{22} = (\theta_{22} - 1)/\Delta t, b_{22} = \theta_{13}/\Delta t. \end{cases}$$
(1.5)

В этих уравнениях введена система обозначений, которая довольно часто применяется в теории идентификации: базисные функции $f_{11}^{(k)} = f_{21}^{(k)} = x_1^{(k)}$, $f_{12}^{(k)} = f_{22}^{(k)} = x_2^{(k)}$, $f_{13}^{(k)} = u_1^{(k)}$, $f_{23}^{(k)} = u_2^{(k)}$ (подразумеваются значения каждой из четырех базисных функций, которые они принимают в опыте с номером (k)); неизвестные параметры модели θ_{11} , θ_{12} , θ_{13} и θ_{21} , θ_{22} , θ_{23} (здесь первый индекс соответствует номеру уравнения, а второй — номеру базисной функции), а также новые обозначения для компонент вектора выходного сигнала $y_1^{(k)} = x_1^{(k+1)}$, $y_2^{(k)} = x_2^{(k+1)}$. Как только будут найдены коэффициенты θ_{11} , θ_{12} , θ_{13} и θ_{21} , θ_{22} , θ_{23} , можно будет найти элементы матриц коэффициентов исходной системы уравнений (1.1) по уже приведенным выше формулам:

$$a_{11} = (\theta_{11} - 1)/\Delta t, \ a_{12} = \theta_{12}/\Delta t, \ b_{11} = \theta_{13}/\Delta t, a_{21} = \theta_{21}/\Delta t, \ a_{22} = (\theta_{22} - 1)/\Delta t, \ b_{22} = \theta_{13}/\Delta t.$$
(1.7)

Преобразования, результатом которых являются уравнения (1.5), (1.6), влекут за собой соответствующие изменения в записи первоначальных результатов измерений (см. табл. 1.1). Эти изменения зафиксированы в табл. 1.2.

Разумеется, нет никакой необходимости выполнять эти преобразования с записями результатов измерений явно, а тем более вручную, но технологию надо четко представлять, чтобы правильно оформить алгоритм расчета параметров модели.

В табл. 1.2 седьмой столбец содержит значения выходного сигнала $y_1^{(k)} = x_1^{(k+1)}$, а третий, четвертый и пятый столбцы — значения базисных функций $f_{11}^{(k)} = x_1^{(k)}$, $f_{12}^{(k)} = x_2^{(k)}$, $f_{13}^{(k)} = u_1^{(k)}$, т. е. всю информацию, необходимую для идентификации параметров уравнения (1.5). Выбирая значения выходного сигнала $y_2^{(k)} = x_2^{(k+1)}$ из восьмого столбца этой таблицы и значения базисных функций $f_{21}^{(k)} = x_1^{(k)}$, $f_{22}^{(k)} = x_2^{(k)}$, $f_{23}^{(k)} = u_2^{(k)}$ из третьего, четвертого и шестого столбцов, мы получаем всю необходимую информацию для идентификации параметров уравнения (1.6).

Таблица 1.2

Запись результатов измерений через значения базисных функций и выходного сигнала

$y_2^{(k)} = x_2^{(k+1)}$	0.1105E+00	0.2443E+00	0.4050E+00	0.5967E+00	0.8244E+00	0.1093E+01	0.1410E+01	0.1780E+01	0.2214E+01	0.2718E+01	0.3305E+01	0.3984E+01	0.4770E+01	0.5677E+01	0.6723E+01	0.7925E+01	0.9306E+01	0.1089E+02	0.1270E+02	0.1478E+02	0.1715E+02
$y_1^{(k)} = x_1^{(k+1)}$	0.1010E+01	0.1042E+01	0.1096E+01	0.1174E+01	0.1279E+01	0.1414E+01	0.1581E+01	0.1784E+01	0.2027E+01	0.2315E+01	0.2653E+01	0.3048E+01	0.3507E+01	0.4037E+01	0.4649E+01	0.5352E+01	0.6158E+01	0.7081E+01	0.8135E+01	0.9338E+01	0.1071E+02
$f_{23}^{(k)} = u_2^{(k)}$	0.1000E+01	0.1105E+01	0.1221E+01	0.1350E+01	0.1492E+01	0.1649E+01	0.1822E+01	0.2014E+01	0.2226E+01	0.2460E+01	0.2718E+01	0.3004E+01	0.3320E+01	0.3669E+01	0.4055E+01	0.4482E+01	0.4953E+01	0.5474E+01	0.6050E+01	0.6686E+01	0.7389E+01
$f_{13}^{(k)} = u_1^{(k)}$	0.1000E+01	0.1105E+01	0.1221E+01	0.1350E+01	0.1492E+01	0.1649E+01	0.1822E+01	0.2014E+01	0.2226E+01	0.2460E+01	0.2718E+01	0.3004E+01	0.3320E+01	0.3669E+01	0.4055E+01	0.4482E+01	0.4953E+01	0.5474E+01	0.6050E+01	0.6686E+01	0.7389E+01
$f_{12}^{(k)} = x_2^{(k)}$	0.0000E+00	0.1105E+00	0.2443E+00	0.4050E+00	0.5967E+00	0.8244E+00	0.1093E+01	0.1410E+01	0.1780E+01	0.2214E+01	0.2718E+01	0.3305E+01	0.3984E+01	0.4770E+01	0.5677E+01	0.6723E+01	0.7925E+01	0.9306E+01	0.1089E+02	0.1270E+02	0.1478E+02
$f_{11}^{(k)} = x_1^{(k)}$	0.1000E+01	0.1010E+01	0.1042E+01	0.1096E+01	0.1174E+01	0.1279E+01	0.1414E+01	0.1581E+01	0.1784E+01	0.2027E+01	0.2315E+01	0.2653E+01	0.3048E+01	0.3507E+01	0.4037E+01	0.4649E+01	0.5352E+01	0.6158E+01	0.7081E+01	0.8135E+01	0.9338E+01
Время t	0.0000E+00	0.1000E+00	0.2000E+00	0.3000E+00	0.4000E+00	0.5000E+00	0.6000E+00	0.7000E+00	0.8000E+00	0.9000E+00	0.1000E+01	0.1100E+01	0.1200E+01	0.1300E+01	0.1400E+01	0.1500E+01	0.1600E+01	0.1700E+01	0.1800E+01	0.1900E+01	0.2000E+01
k	-	7	m	4	5	9	7	8	6	10	.11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Окончание табл. 1.2

	т	<u> </u>	T	-		.	—		T	.
$y_2^{(k)} = x_2^{(k+1)}$	0.1986E+02	0.2294E+02	0.2646E+02	0.3046E+02	0.3501E+02	0.4018E+02	0.4605E+02	0.5271E+02	0.6026E+02	1
$y_1^{(k)} = x_1^{(k+1)}$	0.1227E+02	0.1404E+02	0.1605E+02	0.1834E+02	0.2092E+02	0.2386E+02	0.2718E+02	0.3094E+02	0.3519E+02	l
$f_{23}^{(k)} = u_2^{(k)}$	0.8166E+01	0.9025E+01	0.9974E+01	0.1102E+02	0.1218E+02	0.1346E+02	0.1488E+02	0.1644E+02	0.1817E+02	0.2009E+02
$f_{13}^{(k)} = u_1^{(k)}$	0.8166E+01	0.9025E+01	0.9974E+01	0.1102E+02	0.1218E+02	0.1346E+02	0.1488E+02	0.1644E+02	0.1817E+02	0.2009E+02
$f_{12}^{(k)} = x_2^{(k)}$	0.1715E+02	0.1986E+02	0.2294E+02	0.2646E+02	0.3046E+02	0.3501E+02	0.4018E+02	0.4605E+02	0.5271E+02	0.6026E+02
$f_{11}^{(k)} = x_1^{(k)}$	0.1071E+02	0.1227E+02	0.1404E+02	0.1605E+02	0.1834E+02	0.2092E+02	0.2386E+02	0.2718E+02	0.3094E+02	0.3519E+02
Время t	0.2100E+01	0.2200E+01	0.2300E+01	0.2400E+01	0.2500E+01	0.2600E+01	0.2700E+01	0.2800E+01	0.2900E+01	0.3000E+01
k	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

Метод максимального правдоподобия

В соответствии с теорией метода максимального правдоподобия сформулируем задачи (1.5), (1.6) следующим образом. Целью измерений является определение *M* неизвестных параметров (коэффициентов)

 $\vec{\theta}_1 = \{\theta_{11}, \theta_{12}, ..., \theta_{1M}\}$ для уравнения (1.5) и $\vec{\theta}_2 = \{\theta_{21}, \theta_{22}, ..., \theta_{2M}\}$ для уравнения (1.6).

В нашем примере количество коэффициентов M = 3. Эти параметры должны быть найдены по результатам измерений в N опытах выходного сигнала $\vec{y}_1 = \left\{ y_1^{(1)}, y_1^{(2)}, ..., y_1^{(N)} \right\}$ для уравнения (1.5) и $\vec{y}_2 = \left\{ y_2^{(1)}, y_2^{(2)}, ..., y_2^{(N)} \right\}$ для уравнения (1.6). В нашем примере N = 30, так как в последней строке табл. 1.2 отсутствует результат измерения выходного сигнала. Вектору $\vec{y}_1 = \left\{ y_1^{(1)}, y_1^{(2)}, ..., y_1^{(N)} \right\}$ соответствует седьмой столбец табл. 1.2, а вектору $\vec{y}_2 = \left\{ y_2^{(1)}, y_2^{(2)}, ..., y_2^{(N)} \right\}$ — восьмой столбец этой таблицы.

Величины $f_{11}^{(k)} = x_1^{(k)}$, $f_{12}^{(k)} = x_2^{(k)}$, $f_{13}^{(k)} = u_1^{(k)}$ рассматриваем как компоненты векторной функции $\vec{f}_1^{(k)} = \left\{f_1^{(k)}, f_2^{(k)}, f_{13}^{(k)}\right\}$ (k = 1, 2, ..., N), а величины $f_{21}^{(k)} = x_1^{(k)}$, $f_{22}^{(k)} = x_2^{(k)}$, $f_{23}^{(k)} = u_2^{(k)}$ будем рассматривать как значения компонент векторной функции $\vec{f}_2^{(k)} = \left\{f_1^{(k)}, f_2^{(k)}, f_{23}^{(k)}\right\}$ (k = 1, 2, ..., N), которые измерены в эксперименте с номером (k). Эти компоненты образуют матрицы $\left(f_{1j}^{(k)}\right), \left(f_{2j}^{(k)}\right)$ размера $N \times M$ следующего вида:

$$\left(f_{1j}^{(k)}\right) = \begin{pmatrix} f_1^{(1)} & f_2^{(1)} & f_{13}^{(1)} \\ f_1^{(2)} & f_2^{(2)} & f_{13}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1^{(N)} & f_2^{(N)} & f_{13}^{(N)} \end{pmatrix}, \\ \left(f_{2j}^{(k)}\right) = \begin{pmatrix} f_1^{(1)} & f_2^{(1)} & f_{23}^{(1)} \\ f_1^{(2)} & f_2^{(2)} & f_{23}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1^{(N)} & f_2^{(N)} & f_{13}^{(N)} \end{pmatrix}.$$
(1.8)

Первые два столбца этих матриц соответствуют третьему и четвертому столбцам табл. 1.2, а третий — пятому или шестому столбцу этой таблицы соответственно. Напомним, что здесь индекс (k) означает номер эксперимента (и номер момента времени очередного измерения входного сигнала и вектора состояний), а индекс *j* соответствует номеру компонент векторов параметров $\vec{\theta}_1 = \{\theta_{11}, \theta_{12}, ..., \theta_{1M}\}$ для уравнения (1.5) и $\vec{\theta}_2 = \{\theta_{21}, \theta_{22}, ..., \theta_{2M}\}$ для уравнения (1.6) соответственно (и номеру компонент вектора базисных функций). Для уравнений модели (1.5), (1.6) по результатам измерений можно записать следующие системы уравнений (в методе максимального правдоподобия их еще называют исходными уравнениями):

• •

$$\sum_{j=1}^{M} f_{1j}^{(k)} \Theta_{1j} = y_1^{(k)} \quad (k = 1, 2, ..., N);$$
(1.9)

$$\sum_{j=1}^{M} f_{2j}^{(k)} \Theta_{2j} = y_2^{(k)} \quad (k = 1, 2, ..., N).$$
(1.10)

В соответствии с теорией метода максимального правдоподобия для получения наилучшей линейной несмещенной оценки коэффициентов $\tilde{\vec{\theta}}_1$, $\tilde{\vec{\theta}}_2$ модели (1.5), (1.6) необходимо получить систему нормальных уравнений относительно неизвестных коэффициентов $\tilde{\vec{\theta}}_1$, $\tilde{\vec{\theta}}_2$. Найти их, решая непосредственно уравнения (1.9), (1.10), нельзя, так как результаты содержат случайную ошибку измерений. Метод максимального правдоподобия позволяет найти параметры $\tilde{\vec{\theta}}_1$ и $\tilde{\vec{\theta}}_2$ гиперплоскостей в пространствах $Oy_1f_{11}f_{12}f_{13}$ и $Oy_2f_{21}f_{22}f_{23}$, для которых соответствующее среднеквадратическое отклонение, вычисленное по всем экспериментальным точкам, будет минимально.

Для исходных уравнений (1.9) и (1.10) системы нормальных уравнения имеют вид:

$$\overline{M}_{1}\overline{\widetilde{\Theta}}_{1} = \overline{Y}_{1},
\left(\overline{M}_{1}\right)_{ij} = \sum_{k=1}^{N} f_{1i}^{(k)} f_{1j}^{(k)}, \quad Y_{1i} = \sum_{k=1}^{M} f_{1i}^{(k)} y_{1}^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, ..., M);$$
(1.11)

$$\overline{M}_{2}\overline{\theta}_{2} = \overline{Y}_{2},$$

$$\left(\overline{M}_{2}\right)_{ij} = \sum_{k=1}^{N} f_{2i}^{(k)} f_{2j}^{(k)}, \quad Y_{2i} = \sum_{k=1}^{N} f_{2i}^{(k)} y_{2}^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, ..., M).$$
(1.12)

Таким образом, задача сведена к вычислению элементов информационных матриц \overline{M}_1 , \overline{M}_2 и компонент векторов \overline{Y}_1 , \overline{Y}_2 по заданным в табл. 1.2 значениям базисных функций и выходного сигнала и затем к решению систем (1.11), (1.12). В рассматриваемом примере расчеты дают следующие значения интересующих нас величин:

$$\overline{M}_{1} = \overline{M}_{2} = \begin{pmatrix} 0.4120E + 04 & 0.6837E + 04 & 0.2708E + 04 \\ 0.6837E + 04 & 0.1138E + 05 & 0.4463E + 04 \\ 0.2708E + 04 & 0.4463E + 04 & 0.1817E + 04 \end{pmatrix},
\vec{Y}_{1} = \begin{pmatrix} 0.4698E + 04 \\ 0.7796E + 04 \\ 0.3089E + 04 \end{pmatrix}, \quad \vec{Y}_{2} = \begin{pmatrix} 0.7855E + 04 \\ 0.1307E + 05 \\ 0.5134E + 04 \end{pmatrix}.$$
(1.13)

Решение этих уравнений методом исключения Гаусса с выбором главного элемента по столбцам при расчетах с двойной точностью, выполненных по программе, написанной на языке FORTRAN90, дает следующие значения параметров:

$$\tilde{\theta}_1 = \bar{M}_1^{-1} \vec{Y}_1, \ \tilde{\theta}_{11} = 0.9051 E + 00, \ \tilde{\theta}_{12} = 0.1001 E + 00, \ \tilde{\theta}_{13} = 0.1052 E + 00;$$
(1.14)
 $\tilde{\theta}_2 = \bar{M}_2^{-1} \vec{Y}_2, \ \tilde{\theta}_{21} = -0.5978 E - 03, \ \tilde{\theta}_{22} = 0.1105 E + 01, \ \tilde{\theta}_{23} = 0.1109 E + 00.$ (1.15)

Наконец, по формулам (1.7) находим значения коэффициентов в уравнениях модели (1.1):

$$\tilde{a}_{11} = (\tilde{\theta}_{11} - 1) / \Delta t = -0.9491 \text{E} + 00, \quad \tilde{a}_{12} = \tilde{\theta}_{12} / \Delta t = 0.1001 \text{E} + 01,
\tilde{b}_{11} = \tilde{\theta}_{13} / \Delta t = 0.1052 \text{E} + 01,
\tilde{a}_{21} = \tilde{\theta}_{21} / \Delta t = -0.5978 \text{E} - 02, \quad \tilde{a}_{22} = (\tilde{\theta}_{22} - 1) / \Delta t = 0.1054 \text{E} + 01,
\tilde{b}_{22} = \tilde{\theta}_{13} / \Delta t = 0.1109 \text{E} + 01.$$
(1.16)

Точные значения коэффициентов в данном случае таковы:

$$a_{11} = -1.0, a_{12} = 1.0, b_{11} = 1.0,$$

 $a_{21} = 0.0, a_{22} = 1.0, b_{22} = 1.0.$ (1.17)

Варианты исходных данных для лабораторной работы № 4

По результатам измерений векторов входного сигнала $\vec{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$ и переменных состояния $\vec{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t)\}$ на заданном интервале изменения независимой переменной (времени) $t \in [t_0, T]$ идентифицировать систему (найти параметры), которая в соответствии с принятой гипотезой описывается системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + b_{11}u_1(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + b_{22}u_2(t), \ t \in [t_0, T]. \end{cases}$$

Предполагается, что выполнены измерения непосредственно компонент $x_1(t), x_2(t)$ вектора переменных состояния и входного сигнала $\vec{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$ в дискретном наборе равноотстоящих узлов на оси времени, т. е. с постоянным шагом по времени $\Delta t = \frac{T - t_0}{N}$, с. Результаты измерений приведены в виде таблиц для каждого варианта задачи.

 $\label{eq:constraint} \left\| \mathcal{L} = \mathcal{L} \left[\mathcal{L} \right] \left[\mathcal{L} \right] \left[\mathcal{L} \left[\mathcal{L}$

Результаты измерений входного сигнала
и переменных состояния

Номер	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_{l}(t)$	$u_2(t)$
wara k					
1	0.0000E+00	0.2000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.1000E+00	0.2005E+01	0.9097E+00	0.1000E+00	0.1000E+00
3	0.2000E+00	0.2020E+01	0.8375E+00	0.2000E+00	0.2000E+00
4	0.3000E+00	0.2045E+01	0.7816E+00	0.3000E+00	0.3000E+00
5	0.4000E+00	0.2080E+01	0.7406E+00	0.4000E+00	0.4000E+00
6	0.5000E+00	0.2125E+01	0.7131E+00	0.5000E+00	0.5000E+00
7.	0.6000E+00	0.2180E+01	0.6976E+00	0.6000E+00	0.6000E+00
8	0.7000E+00	0.2245E+01	0.6932E+00	0.7000E+00	0.7000E+00
9	0.8000E+00	0.2320E+01	0.6987E+00	0.8000E+00	0.8000E+00
10	0.9000E+00	0.2405E+01	0.7131E+00	0.9000E+00	0.9000E+00
11	0.1000E+01	0.2500E+01	0.7358E+00	0.1000E+01	0.1000E+01
12	0.1100E+01	0.2605E+01	0.7657E+00	0.1100E+01	0.1100E+01
13	0.1200E+01	0.2720E+01	0.8024E+00	0.1200E+01	0.1200E+01
14	0.1300E+01	0.2845E+01	0.8451E+00	0.1300E+01	0.1300E+01
15	0.1400E+01	0.2980E+01	0.8932E+00	0.1400E+01	0.1400E+01
16	0.1500E+01	0.3125E+01	0.9463E+00	0.1500E+01	0.1500E+01
17	0.1600E+01	0.3280E+01	0.1004E+01	0.1600E+01	0.1600E+01
18	0.1700E+01	0.3445E+01	0.1065E+01	0.1700E+01	0.1700E+01
19	0.1800E+01	0.3620E+01	0.1131E+01	0.1800E+01	0.1800E+01
20	0.1900E+01	0.3805E+01	0.1199E+01	0.1900E+01	0.1900E+01
21	0.2000E+01	0.4000E+01	0.1271E+01	0.2000E+01	0.2000E+01
22	0.2100E+01	0.4205E+01	0.1345E+01	0.2100E+01	0.2100E+01
23	0.2200E+01	0.4420E+01	0.1422E+01	0.2200E+01	0.2200E+01
24	0.2300E+01	0.4645E+01	0.1501E+01	0.2300E+01	0.2300E+01
25	0.2400E+01	0.4880E+01	0.1581E+01	0.2400E+01	0.2400E+01
26	0.2500E+01	0.5125E+01	0.1664E+01	0.2500E+01	0.2500E+01
27	0.2600E+01	0.5380E+01	0.1749E+01	0.2600E+01	0.2600E+01
28	0.2700E+01	0.5645E+01	0.1834E+01	0.2700E+01	0.2700E+01
29	0.2800E+01	0.5920E+01	0.1922E+01	0.2800E+01	0.2800E+01
30	0.2900E+01	0.6205E+01	0.2010E+01	0.2900E+01	0.2900E+01
31	0.3000E+02	0.6500E+01	0.2100E+01	0.3000E+02	0.3000E+02
		1	1	1	1

Номер	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_{\gamma}(t)$
шага			-		2
k					
1	0.0000E+00	0.1750E+01	0.7500E+00	0.1250E+00	0.1250E+00
2	0.1000E+00	0.1834E+01	0.7589E+00	0.1225E+00	0.1225E+00
3	0.2000E+00	0.1911E+01	0.7596E+00	0.1151E+00	0.1151E+00
4	0.3000E+00	0.1977E+01	0.7501E+00	0.1032E+00	0.1032E+00
5	0.4000E+00	0.2030E+01	0.7285E+00	0.8709E-01	0.8709E-01
6	0.5000E+00	0.2065E+01	0.6926E+00	0.6754E-01	0.6754E-01
7	0.6000E+00	0.2079E+01	0.6403E+00	0.4529E-01	0.4529E-01
8	0.7000E+00	0.2069E+01	0.5692E+00	0.2125E-01	0.2125E-01
9	0.8000E+00	0.2029E+01	0.4770E+00	-0.3650E-02	-0.3650E-02
10	0.9000E+00	0.1956E+01	0.3615E+00	-0.2840E-01	-0.2840E-01
11	0.1000E+01	0.1844E+01	0.2203E+00	-0.5202E-01	-0.5202E-01
12	0.1100E+01	0.1689E+01	0.5114E-01	-0.7356E-01	-0.7356E-01
13	0.1200E+01	0.1485E+01	-0.1482E+00	-0.9217E-01	-0.9217E-01
14	0.1300E+01	0.1227E+01	-0.3799E+00	-0.1071E+00	-0.1071E+00
15	0.1400E+01	0.9100E+00	-0.6458E+00	-0.1178E+00	-0.1178E+00
16	0.1500E+01	0.5286E+00	-0.9478E+00	-0.1237E+00	-0.1237E+00
17	0.1600E+01	0.7742E-01	-0.1288E+01	-0.1248E+00	-0.1248E+00
18	0.1700E+01	-0.4490E+00	-0.1667E+01	-0.1208E+00	-0.1208E+00
19	0.1800E+01	-0.1056E+01	-0.2086E+01	-0.1121E+00	-0.1121E+00
20	0.1900E+01	-0.1748E+01	-0.2547E+01	-0.9887E-01	-0.9887E-01
21	0.2000E+01	-0.2530E+01	-0.3050E+01	-0.8171E-01	-0.8171E-01
22	0.2100E+01	-0.3407E+01	-0.3595E+01	-0.6128E-01	-0.6128E-01
23	0.2200E+01	-0.4384E+01	-0.4183E+01	-0.3842E-01	-0.3842E-01
24	0.2300E+01	-0.5462E+01	-0.4812E+01	-0.1402E-01	-0.1402E-01
25	0.2400E+01	-0.6647E+01	-0.5482E+01	0.1094E-01	0.1094E-01
26	0.2500E+01	-0.7940E+01	-0.6192E+01	0.3546E-01	0.3546E-01
27	0.2600E+01	-0.9343E+01	-0.6939E+01	0.5856E-01	0.5856E-01
28	0.2700E+01	-0.1086E+02	-0.7720E+01	0.7934E-01	0.7934E-01
29	0.2800E+01	-0.1248E+02	-0.8532E+01	0.9695E-01	0.9695E-01
30	0.2900E+01	-0.1421E+02	-0.9370E+01	0.1107E+00	0.1107E+00
31	0.3000E+02	-0.1605E+02	-0.1023E+02	0.1200E+00	0.1200E+00
					l

Номер	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
шага			-	•	
k					
1,	0.0000E+00	-0.2000E+01	0.0000E+00	-0.1000E+01	-0.2000E+01
2	0.1000E+00	-0.1561E+01	0.3199E+00	-0.4952E+00	-0.1590E+01
3	0.2000E+00	-0.1108E+01	0.6157E+00	0.1860E-01	-0.1160E+01
4	0.3000E+00	-0.6510E+00	0.8825E+00	0.5402E+00	-0.7107E+00
5	0.4000E+00	-0.1966E+00	0.1117E+01	0.1068E+01	-0.2421E+00
6	0.5000E+00	0.2487E+00	0.1317E+01	0.1602E+01	0.2448E+00
7	0.6000E+00	0.6797E+00	0.1481E+01	0.2139E+01	0.7493E+00
8	0.7000E+00	0.1092E+01	0.1611E+01	0.2679E+01	0.1270E+01
9	0.8000E+00	0.1483E+01	0.1706E+01	0.3221E+01	0.1807E+01
10	0.9000E+00	0.1850E+01	0.1770E+01	0.3762E+01	0.2357E+01
11	0.1000E+01	0.2191E+01	0.1806E+01	0.4301E+01	0.2919E+01
12	0.1100E+01	0.2508E+01	0.1816E+01	0.4838E+01	0.3493E+01
13	0.1200E+01	0.2799E+01	0.1806E+01	0.5370E+01	0.4075E+01
14	0.1300E+01	0.3067E+01	0.1778E+01	0.5896E+01	0.4665E+01
15	0.1400E+01	0.3313E+01	0.1738E+01	0.6415E+01	0.5260E+01
16	0.1500E+01	0.3540E+01	0.1690E+01	0.6927E+01	0.5859E+01
17	0.1600E+01	0.3749E+01	0.1638E+01	0.7429E+01	0.6458E+01
18	0.1700E+01	0.3945E+01	0.1586E+01	0.7921E+01	0.7058E+01
19	0.1800E+01	0.4129E+01	0.1537E+01	0.8401E+01	0.7654E+01
20	0.1900E+01	0.4305E+01	0.1496E+01	0.8870E+01	0.8247E+01
21	0.2000E+01	0.4475E+01	0.1464E+01	0.9325E+01	0.8832E+01
22	0.2100E+01	0.4642E+01	0.1444E+01	0.9768E+01	0.9410E+01
23	0.2200E+01	0.4809E+01	0.1437E+01	0.1020E+02	0.9977E+01
24	0.2300E+01	0.4978E+01	0.1445E+01	0.1061E+02	0.1053E+02
25	0.2400E+01	0.5150E+01	0.1469E+01	0.1101E+02	0.1107E+02
26	0.2500E+01	0.5327E+01	0.1507E+01	0.1140E+02	0.1160E+02
27	0.2600E+01	0.5509E+01	0.1560E+01	0.1177E+02	0.1211E+02
28	0.2700E+01	0.5699E+01	0.1627E+01	0.1213E+02	0.1261E+02
29	0.2800E+01	0.5894E+01	0.1707E+01	0.1248E+02	0.1308E+02
30	0.2900E+01	0.6097E+01	0.1797E+01	0.1281E+02	0.1354E+02
31	0.3000E+02	0.6306E+01	0.1895E+01	0.1313E+02	0.1398E+02
		i la			

Ho-	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
мер		-			_
шага					
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	0.1500E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01
2	0.1047E+00	0.1343E+01	-0.2534E+00	0.1045E+00	0.9945E+00
3	0.2094E+00	0.1188E+01	-0.4893E+00	0.2079E+00	0.9781E+00
4	0.3142E+00	0.1036E+01	-0.7068E+00	0.3090E+00	0.9511E+00
5	0.4189E+00	0.8881E+00	-0.9052E+00	0.4067E+00	0.9135E+00
6	0.5236E+00	0.7458E+00	-0.1084E+01	0.5000E+00	0.8660E+00
7	0.6283E+00	0.6099E+00	-0.1243E+01	0.5878E+00	0.8090E+00
8	0.7330E+00	0.4812E+00	-0.1381E+01	0.6691E+00	0.7431E+00
9	0.8378E+00	0.3602E+00	-0.1499E+01	0.7431E+00	0.6691E+00
10	0.9425E+00	0.2475E+00	-0.1597E+01	0.8090E+00	0.5878E+00
11	0.1047E+01	0.1435E+00	-0.1674E+01	0.8660E+00	0.5000E+00
12	0.1152E+01	0.4828E-01	-0.1732E+01	0.9135E+00	0.4067E+00
13	0.1257E+01	-0.3795E-01	-0.1770E+01	0.9511E+00	0.3090E+00
14	0.1361E+01	-0.1152E+00	-0.1789E+01	0.9781E+00	0.2079E+00
15	0.1466E+01	-0.1836E+00	-0.1789E+01	0.9945E+00	0.1045E+00
16	0.1571E+01	-0.2433E+00	-0.1772E+01	0.1000E+01	0.7550E-07
17	0.1676E+01	-0.2945E+00	-0.1739E+01	0.9945E+00	-0.1045E+00
18	0.1780E+01	-0.3375E+00	-0.1689E+01	0.9781E+00	-0.2079E+00
19	0.1885E+01	-0.3728E+00	-0.1625E+01	0.9511E+00	-0.3090E+00
20	0.1990E+01	-0.4007E+00	-0.1547E+01	0.9135E+00	-0.4067E+00
21	0.2094E+01	-0.4216E+00	-0.1456E+01	0.8660E+00	-0.5000E+00
22	0.2199E+01	-0.4361E+00	-0.1354E+01	0.8090E+00	-0.5878E+00
23	0.2304E+01	-0.4446E+00	-0.1242E+01	0.7431E+00	-0.6691E+00
24	0.2409E+01	-0.4476E+00	-0.1121E+01	0.6691E+00	-0.7431E+00
25	0.2513E+01	-0.4457E+00	-0.9930E+00	0.5878E+00	-0.8090E+00
26	0.2618E+01	-0.4393E+00	-0.8589E+00	0.5000E+00	-0.8660E+00
27	0.2723E+01	-0.4290E+00	-0.7201E+00	0.4067E+00	-0.9135E+00
28	0.2827E+01	-0.4153E+00	-0.5782E+00	0.3090E+00	-0.9511E+00
29	0.2932E+01	-0.3986E+00	-0.4344E+00	0.2079E+00	-0.9781E+00
30	0.3037E+01	-0.3794E+00	-0.2903E+00	0.1045E+00	-0.9945E+00
31	0.3142E+01	-0.3582E+00	-0.1471E+00	0.1510E-06	-0.1000E+01
	1				

Номер	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
шага					-
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	0.2000E+01	0.2000E+01	-0.5000E+01	-0.1000E+01
2	0.1000E+00	0.2286E+01	0.2191E+01	-0.4500E+01	0.9000E+00
3	0.2000E+00	0.2550E+01	0.2368E+01	-0.4000E+01	-0.8000E+00
4	0.3000E+00	0.2798E+01	0.2535E+01	-0.3500E+01	-0.7000E+00
5	0.4000E+00	0.3037E+01	0.2698E+01	-0.3000E+01	-0.6000E+00
6	0.5000E+00	0.3273E+01	0.2861E+01	-0.2500E+01	-0.5000E+00
7	0.6000E+00	0.3510E+01	0.3027E+01	-0.2000E+01	-0.4000E+00
8	0.7000E+00	0.3752E+01	0.3200E+01	-0.1500E+01	-0.3000E+00
9	0.8000E+00	0.4005E+01	0.3384E+01	-0.1000E+01	-0.2000E+00
10	0.9000E+00	0.4272E+01	0.3581E+01	-0.5000E+00	-0.1000E+00
11	0.1000E+01	0.4557E+01	0.3793E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
12	0.1100E+01	0.4862E+01	0.4023E+01	0.5000E+00	0.1000E+00
13	0.1200E+01	0.5190E+01	0.4273E+01	0.1000E+01	0.2000E+00
14	0.1300E+01	0.5545E+01	0.4545E+01	0.1500E+01	0.3000E+00
15	0.1400E+01	0.5927E+01	0.4840E+01	0.2000E+01	0.4000E+00
16	0.1500E+01	0.6340E+01	0.5161E+01	0.2500E+01	0.5000E+00
17	0.1600E+01	0.6785E+01	0.5509E+01	0.3000E+01	0.6000E+00
18	0.1700E+01	0.7264E+01	0.5884E+01	0.3500E+01	0.7000E+00
19	0.1800E+01	0.7778E+01	0.6288E+01	0.4000E+01	0.8000E+00
20	0.1900E+01	0.8328E+01	0.6723E+01	0.4500E+01	0.9000E+00
21	0.2000E+01	0.8917E+01	0.7188E+01	0.5000E+01	0.1000E+01
22	0.2100E+01	0.9545E+01	0.7685E+01	0.5500E+01	0.1100E+01
23	0.2200E+01	0.1021E+02	0.8215E+01	0.6000E+01	0.1200E+01
24	0.2300E+01	0.1092E+02	0.8778E+01	0.6500E+01	0.1300E+01
25	0.2400E+01	0.1167E+02	0.9376E+01	0.7000E+01	0.1400E+01
26	0.2500E+01	0.1247E+02	0.1001E+02	0.7500E+01	0.1500E+01
27	0.2600E+01	0.1331E+02	0.1067E+02	0.8000E+01	0.1600E+01
28	0.2700E+01	0.1419E+02	0.1138E+02	0.8500E+01	0.1700E+01
29	0.2800E+01	0.1511E+02	0.1212E+02	0.9000E+01	0.1800E+01
30	0.2900E+01	0.1608E+02	0.1289E+02	0.9500E+01	0.1900E+01
31	0.3000E+02	0.1710E+02	0.1370E+02	0.1000E+02	0.2000E+01
1		1	1	1	1

Image kImage kImage k1 $0.0000E+00$ $0.9313E-08$ $0.0000E+00$ $0.5000E+01$ $0.1000E+01$ 2 $0.1000E+01$ $0.5030E-01$ $0.4020E-01$ $0.4950E+01$ $0.9900E+00$ 3 $0.2000E+01$ $0.1012E+00$ $0.8033E-01$ $0.4901E+01$ $0.9900E+00$ 4 $0.3000E-01$ $0.1528E+00$ $0.1219E+00$ $0.4852E+01$ $0.9704E+00$ 5 $0.4000E-01$ $0.2551E+00$ $0.1635E+00$ $0.4852E+01$ $0.9704E+00$ 6 $0.5000E-01$ $0.2581E+00$ $0.2055E+00$ $0.4756E+01$ $0.9512E+00$ 7 $0.6000E-01$ $0.3118E+00$ $0.2481E+00$ $0.4709E+01$ $0.9418E+00$ 8 $0.7000E-01$ $0.3663E+00$ $0.2912E+00$ $0.4662E+01$ $0.9324E+00$ 9 $0.8000E-01$ $0.4216E+00$ $0.3349E+00$ $0.4616E+01$ $0.9231E+00$ 10 $0.9000E+01$ $0.4216E+00$ $0.4570E+01$ $0.9139E+00$ 11 $0.1000E+00$ $0.5346E+00$ $0.44241E+00$ $0.4524E+01$ $0.9048E+00$ 12 $0.1100E+00$ $0.5525E+00$ $0.4696E+00$ $0.4435E+01$ $0.8697E+00$ 13 $0.1200E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4330E+01$ $0.8607E+00$ 14 $0.1300E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4334E+01$ $0.8607E+00$ 15 $0.1400E+00$ $0.8962E+00$ $0.7580E+00$ $0.4231E+01$ $0.8672E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.1225E+01$ $0.8088E+00$ $0.4135E+01$ $0.8672E+00$ 1	Номер	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	шага к					
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.0000E+00	0.9313E-08	0.0000E+00	0.5000E+01	0.1000E+01
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2	0.1000E-01	0.5030E-01	0.4020E-01	0.4950E+01	0.9900E+00
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3	0.2000E-01	0.1012E+00	0.8083E-01	0.4901E+01	0.9802E+00
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	4	0.3000E-01	0.1528E+00	0.1219E+00	0.4852E+01	0.9704E+00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5	0.4000E-01	0.2051E+00	0.1635E+00	0.4804E+01	0.9608E+00
7 $0.6000E-01$ $0.3118E+00$ $0.2481E+00$ $0.4709E+01$ $0.9418E+00$ 8 $0.7000E-01$ $0.3663E+00$ $0.2912E+00$ $0.4662E+01$ $0.9324E+00$ 9 $0.8000E-01$ $0.4216E+00$ $0.3349E+00$ $0.4616E+01$ $0.9231E+00$ 10 $0.9000E-01$ $0.4777E+00$ $0.3791E+00$ $0.4570E+01$ $0.9139E+00$ 11 $0.1000E+00$ $0.5346E+00$ $0.4241E+00$ $0.4524E+01$ $0.9048E+00$ 12 $0.1100E+00$ $0.5925E+00$ $0.4696E+00$ $0.4479E+01$ $0.8858E+00$ 13 $0.1200E+00$ $0.6513E+00$ $0.5158E+00$ $0.4435E+01$ $0.8869E+00$ 14 $0.1300E+00$ $0.7110E+00$ $0.5628E+00$ $0.4390E+01$ $0.8781E+00$ 15 $0.1400E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4347E+01$ $0.8694E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.8962E+00$ $0.7080E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 17 $0.1600E+00$ $0.8962E+00$ $0.7880E+00$ $0.4218E+01$ $0.8437E+00$ 18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4135E+01$ $0.8437E+00$ 20 $0.190E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4135E+01$ $0.8437E+00$ 21 $0.200E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4094E+01$ $0.8106E+00$ 22 $0.2100E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4033E+01$ $0.8025E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 25 $0.2400E+00$ 0	6	0.5000E-01	0.2581E+00	0.2055E+00	0.4756E+01	0.9512E+00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7	0.6000E-01	0.3118E+00	0.2481E+00	0.4709E+01	0.9418E+00
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	8	0.7000E-01	0.3663E+00	0.2912E+00	0.4662E+01	0.9324E+00
10 $0.9000E-01$ $0.4777E+00$ $0.3791E+00$ $0.4570E+01$ $0.9139E+00$ 11 $0.1000E+00$ $0.5346E+00$ $0.4241E+00$ $0.4524E+01$ $0.9048E+00$ 12 $0.1100E+00$ $0.5925E+00$ $0.4696E+00$ $0.4479E+01$ $0.8958E+00$ 13 $0.1200E+00$ $0.6513E+00$ $0.5158E+00$ $0.4435E+01$ $0.8869E+00$ 14 $0.1300E+00$ $0.7110E+00$ $0.5628E+00$ $0.4390E+01$ $0.8781E+00$ 15 $0.1400E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4347E+01$ $0.8694E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.8334E+00$ $0.6588E+00$ $0.4304E+01$ $0.8607E+00$ 17 $0.1600E+00$ $0.8962E+00$ $0.7880E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4218E+01$ $0.8437E+00$ 20 $0.1900E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4176E+01$ $0.8353E+00$ 21 $0.2000E+00$ $0.1025E+01$ $0.8605E+00$ $0.4135E+01$ $0.8187E+00$ 22 $0.2100E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4053E+01$ $0.8106E+00$ 23 $0.2200E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1548E+01$ $0.1133E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 25 $0.2400E+00$ $0.1548E+01$ $0.1249E+01$ $0.3855E+01$ $0.7711E+00$ 26 $0.2500E+00$ $0.1589E+01$ $0.1249E+01$ $0.3877E+01$ $0.7634E+00$ 27 $0.2600E+00$ <	9	0.8000E-01	0.4216E+00	0.3349E+00	0.4616E+01	0.9231E+00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	10	0.9000E-01	0.4777E+00	0.3791E+00	0.4570E+01	0.9139E+00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	11	0.1000E+00	0.5346E+00	0.4241E+00	0.4524E+01	0.9048E+00
13 $0.1200E+00$ $0.6513E+00$ $0.5158E+00$ $0.4435E+01$ $0.8869E+00$ 14 $0.1300E+00$ $0.7110E+00$ $0.5628E+00$ $0.4390E+01$ $0.8781E+00$ 15 $0.1400E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4347E+01$ $0.8694E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.8334E+00$ $0.6588E+00$ $0.4304E+01$ $0.8607E+00$ 17 $0.1600E+00$ $0.8962E+00$ $0.7080E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4218E+01$ $0.8437E+00$ 19 $0.1800E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4176E+01$ $0.8353E+00$ 20 $0.1900E+00$ $0.1091E+01$ $0.8605E+00$ $0.4135E+01$ $0.8270E+00$ 21 $0.2000E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4038E+01$ $0.8106E+00$ 23 $0.2200E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4033E+01$ $0.8025E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3973E+01$ $0.7945E+00$ 25 $0.2400E+00$ $0.1514E+01$ $0.1133E+01$ $0.3894E+01$ $0.7788E+00$ 26 $0.2500E+00$ $0.1589E+01$ $0.1249E+01$ $0.3855E+01$ $0.7711E+00$ 28 $0.2700E+00$ $0.1666E+01$ $0.1309E+01$ $0.3779E+01$ $0.7558E+00$ 30 $0.2900E+00$ $0.1824E+01$ $0.1432E+01$ $0.3704E+01$ $0.7408E+00$ 31 $0.3000E+00$ $0.1905E+01$ $0.1495E+01$ $0.3704E+01$ $0.7408E+00$	12	0.1100E+00	0.5925E+00	0.4696E+00	0.4479E+01	0.8958E+00
14 $0.1300E+00$ $0.7110E+00$ $0.5628E+00$ $0.4390E+01$ $0.8781E+00$ 15 $0.1400E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4347E+01$ $0.8694E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.8334E+00$ $0.6588E+00$ $0.4304E+01$ $0.8607E+00$ 17 $0.1600E+00$ $0.8962E+00$ $0.7080E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 19 $0.1800E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4176E+01$ $0.8353E+00$ 20 $0.1900E+00$ $0.1025E+01$ $0.8055E+00$ $0.4135E+01$ $0.8270E+00$ 21 $0.2000E+00$ $0.1158E+01$ $0.9131E+00$ $0.4094E+01$ $0.8187E+00$ 22 $0.2100E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4053E+01$ $0.8025E+00$ 23 $0.2200E+00$ $0.1297E+01$ $0.1021E+01$ $0.4013E+01$ $0.8025E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 25 $0.2400E+00$ $0.1514E+01$ $0.1133E+01$ $0.3894E+01$ $0.7788E+00$ 26 $0.2500E+00$ $0.1589E+01$ $0.1249E+01$ $0.3817E+01$ $0.7634E+00$ 28 $0.2700E+00$ $0.1824E+01$ $0.1370E+01$ $0.3779E+01$ $0.7558E+00$ 30 $0.2900E+00$ $0.1824E+01$ $0.1432E+01$ $0.3704E+01$ $0.7408E+00$	13	0.1200E+00	0.6513E+00	0.5158E+00	0.4435E+01	0.8869E+00
15 $0.1400E+00$ $0.7717E+00$ $0.6104E+00$ $0.4347E+01$ $0.8694E+00$ 16 $0.1500E+00$ $0.8334E+00$ $0.6588E+00$ $0.4304E+01$ $0.8607E+00$ 17 $0.1600E+00$ $0.8962E+00$ $0.7080E+00$ $0.4261E+01$ $0.8521E+00$ 18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4261E+01$ $0.8437E+00$ 19 $0.1800E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4176E+01$ $0.8353E+00$ 20 $0.1900E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4135E+01$ $0.8270E+00$ 21 $0.2000E+00$ $0.1158E+01$ $0.9131E+00$ $0.4094E+01$ $0.8187E+00$ 22 $0.2100E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4053E+01$ $0.8106E+00$ 23 $0.2200E+00$ $0.1297E+01$ $0.1021E+01$ $0.4013E+01$ $0.8025E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 25 $0.2400E+00$ $0.1514E+01$ $0.1133E+01$ $0.3894E+01$ $0.7788E+00$ 26 $0.2500E+00$ $0.1589E+01$ $0.1249E+01$ $0.3817E+01$ $0.7634E+00$ 28 $0.2700E+00$ $0.1824E+01$ $0.1370E+01$ $0.3779E+01$ $0.7634E+00$ 30 $0.2900E+00$ $0.1824E+01$ $0.1432E+01$ $0.3704E+01$ $0.7408E+00$	14	0.1300E+00	0.7110E+00	0.5628E+00	0.4390E+01	0.8781E+00
160.1500E+000.8334E+000.6588E+000.4304E+010.8607E+00170.1600E+000.8962E+000.7080E+000.4261E+010.8521E+00180.1700E+000.9600E+000.7580E+000.4218E+010.8437E+00190.1800E+000.1025E+010.8088E+000.4176E+010.8353E+00200.1900E+000.1091E+010.8605E+000.4135E+010.8270E+00210.2000E+000.1158E+010.9131E+000.4094E+010.8187E+00220.2100E+000.1227E+010.9667E+000.4053E+010.8106E+00230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1514E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3779E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	15	0.1400E+00	0.7717E+00	0.6104E+00	0.4347E+01	0.8694E+00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	16	0.1500E+00	0.8334E+00	0.6588E+00	0.4304E+01	0.8607E+00
18 $0.1700E+00$ $0.9600E+00$ $0.7580E+00$ $0.4218E+01$ $0.8437E+00$ 19 $0.1800E+00$ $0.1025E+01$ $0.8088E+00$ $0.4176E+01$ $0.8353E+00$ 20 $0.1900E+00$ $0.1091E+01$ $0.8605E+00$ $0.4135E+01$ $0.8270E+00$ 21 $0.2000E+00$ $0.1158E+01$ $0.9131E+00$ $0.4094E+01$ $0.8187E+00$ 22 $0.2100E+00$ $0.1227E+01$ $0.9667E+00$ $0.4053E+01$ $0.8106E+00$ 23 $0.2200E+00$ $0.1297E+01$ $0.1021E+01$ $0.4013E+01$ $0.8025E+00$ 24 $0.2300E+00$ $0.1368E+01$ $0.1077E+01$ $0.3973E+01$ $0.7945E+00$ 25 $0.2400E+00$ $0.1514E+01$ $0.1133E+01$ $0.3933E+01$ $0.7866E+00$ 26 $0.2500E+00$ $0.1589E+01$ $0.1249E+01$ $0.3855E+01$ $0.7711E+00$ 28 $0.2700E+00$ $0.1666E+01$ $0.1309E+01$ $0.3779E+01$ $0.7558E+00$ 30 $0.2900E+00$ $0.1824E+01$ $0.1432E+01$ $0.3741E+01$ $0.7483E+00$ 31 $0.3000E+00$ $0.1905E+01$ $0.1495E+01$ $0.3704E+01$ $0.7408E+00$	17	0.1600E+00	0.8962E+00	0.7080E+00	0.4261E+01	0.8521E+00
190.1800E+000.1025E+010.8088E+000.4176E+010.8353E+00200.1900E+000.1091E+010.8605E+000.4135E+010.8270E+00210.2000E+000.1158E+010.9131E+000.4094E+010.8187E+00220.2100E+000.1227E+010.9667E+000.4053E+010.8106E+00230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1514E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	18	0.1700E+00	0.9600E+00	0.7580E+00	0.4218E+01	0.8437E+00
200.1900E+000.1091E+010.8605E+000.4135E+010.8270E+00210.2000E+000.1158E+010.9131E+000.4094E+010.8187E+00220.2100E+000.1227E+010.9667E+000.4053E+010.8106E+00230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3817E+010.7634E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	19	0.1800E+00	0.1025E+01	0.8088E+00	0.4176E+01	0.8353E+00
210.2000E+000.1158E+010.9131E+000.4094E+010.8187E+00220.2100E+000.1227E+010.9667E+000.4053E+010.8106E+00230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00280.2700E+000.1666E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3704E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	20	0.1900E+00	0.1091E+01	0.8605E+00	0.4135E+01	0.8270E+00
220.2100E+000.1227E+010.9667E+000.4053E+010.8106E+00230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3704E+010.7408E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	21	0.2000E+00	0.1158E+01	0.9131E+00	0.4094E+01	0.8187E+00
230.2200E+000.1297E+010.1021E+010.4013E+010.8025E+00240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3704E+010.7408E+00	22	0.2100E+00	0.1227E+01	0.9667E+00	0.4053E+01	0.8106E+00
240.2300E+000.1368E+010.1077E+010.3973E+010.7945E+00250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3704E+010.7408E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	23	0.2200E+00	0.1297E+01	0.1021E+01	0.4013E+01	0.8025E+00
250.2400E+000.1440E+010.1133E+010.3933E+010.7866E+00260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3704E+010.7408E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	24	0.2300E+00	0.1368E+01	0.1077E+01	0.3973E+01	0.7945E+00
260.2500E+000.1514E+010.1191E+010.3894E+010.7788E+00270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	25	0.2400E+00	0.1440E+01	0.1133E+01	0.3933E+01	0.7866E+00
270.2600E+000.1589E+010.1249E+010.3855E+010.7711E+00280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	26	0.2500E+00	0.1514E+01	0.1191E+01	0.3894E+01	0.7788E+00
280.2700E+000.1666E+010.1309E+010.3817E+010.7634E+00290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	27	0.2600E+00	0.1589E+01	0.1249E+01	0.3855E+01	0.7711E+00
290.2800E+000.1744E+010.1370E+010.3779E+010.7558E+00300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	28	0.2700E+00	0.1666E+01	0.1309E+01	0.3817E+01	0.7634E+00
300.2900E+000.1824E+010.1432E+010.3741E+010.7483E+00310.3000E+000.1905E+010.1495E+010.3704E+010.7408E+00	29	0.2800E+00	0.1744E+01	0.1370E+01	0.3779E+01	0.7558E+00
31 0.3000E+00 0.1905E+01 0.1495E+01 0.3704E+01 0.7408E+00	30	0.2900E+00	0.1824E+01	0.1432E+01	0.3741E+01	0.7483E+00
	31	0.3000E+00	0.1905E+01	0.1495E+01	0.3704E+01	0.7408E+00

Но- мер шага	Время t	$x_{l}(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
k					
1	0.0000E+00	0.1000E+01	-0.1300E+02	0.1000E+01	0.1000E+01
2	0.1000E-01	0.9884E+00	-0.1320E+02	0.9900E+00	0.1010E+01
3	0.2000E-01	0.9732E+00	-0.1339E+02	0.9802E+00	0.1020E+01
4	0.3000E-01	0.9542E+00	-0.1357E+02	0.9704E+00	0.1030E+01
5	0.4000E-01	0.9310E+00	-0.1374E+02	0.9608E+00	0.1041E+01
6	0.5000E-01	0.9033E+00	-0.1390E+02	0.9512E+00	0.1051E+01
7	0.6000E-01	0.8705E+00	-0.1405E+02	0.9418E+00	0.1062E+01
8	0.7000E-01	0.8324E+00	-0.1419E+02	0.9324E+00	0.1073E+01
9	0.8000E-01	0.7884E+00	-0.1431E+02	0.9231E+00	0.1083E+01
10	0.9000E-01	0.7380E+00	-0.1441E+02	0.9139E+00	0.1094E+01
11	0.1000E+00	0.6806E+00	-0.1449E+02	0.9048E+00	0.1105E+01
12	0.1100E+00	0.6157E+00	-0.1455E+02	0.8958E+00	0.1116E+01
13	0.1200E+00	0.5427E+00	-0.1459E+02	0.8869E+00	0.1127E+01
14	0.1300E+00	0.4609E+00	-0.1459E+02	0.8781E+00	0.1139E+01
15	0.1400E+00	0.3695E+00	-0.1457E+02	0.8694E+00	0.1150E+01
16	0.1500E+00	0.2679E+00	-0.1451E+02	0.8607E+00	0.1162E+01
17	0.1600E+00	0.1551E+00	-0.1442E+02	0.8521E+00	0.1174E+01
18	0.1700E+00	0.3031E-01	-0.1429E+02	0.8437E+00	0.1185E+01
19	0.1800E+00	-0.1074E+00	-0.1411E+02	0.8353E+00	0.1197E+01
20	0.1900E+00	-0.2591E+00	-0.1388E+02	0.8270E+00	0.1209E+01
21	0.2000E+00	-0.4259E+00	-0.1360E+02	0.8187E+00	0.1221E+01
22	0.2100E+00	-0.6088E+00	-0.1326E+02	0.8106E+00	0.1234E+01
23	0.2200E+00	-0.8092E+00	-0.1286E+02	0.8025E+00	0.1246E+01
24	0.2300E+00	-0.1028E+01	-0.1238E+02	0.7945E+00	0.1259E+01
25	0.2400E+00	-0.1268E+01	-0.1184E+02	0.7866E+00	0.1271E+01
26	0.2500E+00	-0.1529E+01	-0.1121E+02	0.7788E+00	0.1284E+01
27	0.2600E+00	-0.1813E+01	-0.1049E+02	0.7711E+00	0.1297E+01
28	0.2700E+00	-0.2123E+01	-0.9673E+01	0.7634E+00	0.1310E+01
29	0.2800E+00	-0.2459E+01	-0.8754E+01	0.7558E+00	0.1323E+01
30	0.2900E+00	-0.2824E+01	-0.7721E+01	0.7483E+00	0.1336E+01
31	0.3000E+00	-0.3221E+01	-0.6566E+01	0.7408E+00	0.1350E+01

Результаты измерений входного сигнала и переменных состояния

Ho-					8
мер	Rnews /	$\mathbf{r}_{\mathbf{r}}(t)$	$\mathbf{r}_{\mathbf{r}}(t)$	$y_{i}(t)$	$u_{o}(t)$
шага	Бреми.	200	~2(0)	••[(•)	u 2(t)
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.1000E+01	0.1000E+01	0.1000E+01
2	0.1000E-01	-0.2552E-03	-0.1051E+01	0.1000E+01	0.1000E+01
3	0.2000E-01	-0.1042E-02	-0.1104E+01	0.9998E+00	0.9998E+00
4	0.3000E-01	-0.2395E-02	-0.1159E+01	0.9996E+00	0.9996E+00
5	0.4000E-01	-0.4348E-02	-0.1217E+01	0.9992E+00	0.9992E+00
6	0.5000E-01	-0.6939E-02	-0.1277E+01	0.9988E+00	0.9988E+00
7	0.6000E-01	-0.1021E-01	-0.1340E+01	0.9982E+00	0.9982E+00
8	0.7000E-01	-0.1419E-01	-0.1405E+01	0.9976E+00	0.9976E+00
9	0.8000E-01	-0.1893E-01	-0.1473E+01	0.9968E+00	0.9968E+00
10	0.9000E-01	-0.2448E-01	-0.1544E+01	0.9960E+00	0.9960E+00
11	0.1000E+00	-0.3089E-01	-0.1618E+01	0.9950E+00	0.9950E+00
12	0.1100E+00	-0.3819E-01	-0.1695E+01	0.9940E+00	0.9940E+00
13	0.1200E+00	-0.4646E-01	-0.1776E+01	0.9928E+00	0.9928E+00
14	0.1300E+00	-0.5573E-01	-0.1860E+01	0.9916E+00	0.9916E+00
15	0.1400E+00	-0.6607E-01	-0.1948E+01	0.9902E+00	0.9902E+00
16	0.1500E+00	-0.7754E-01	-0.2039E+01	0.9888E+00	0.9888E+00
17	0.1600E+00	-0.9021E-01	-0.2135E+01	0.9872E+00	0.9872E+00
18	0.1700E+00	-0.1041E+00	-0.2236E+01	0.9856E+00	0.9856E+00
19	0.1800E+00	-0.1194E+00	-0.2340E+01	0.9838E+00	0.9838E+00
20	0.1900E+00	-0.1361E+00	-0.2450E+01	0.9820E+00	0.9820E+00
21	0.2000E+00	-0.1542E+00	-0.2564E+01	0.9801E+00	0.9801E+00
22	0.2100E+00	-0.1739E+00	-0.2684E+01	0.9780E+00	0.9780E+00
23	0.2200E+00	-0.1953E+00	-0.2809E+01	0.9759E+00	0.9759E+00
24	0.2300E+00	-0.2184E+00	-0.2940E+01	0.9737E+00	0.9737E+00
25	0.2400E+00	-0.2434E+00	-0.3077E+01	0.9713E+00	0.9713E+00
26	0.2500E+00	-0.2703E+00	-0.3220E+01	0.9689E+00	0.9689E+00
27	0.2600E+00	-0.2993E+00	-0.3370E+01	0.9664E+00	0.9664E+00
28	0.2700E+00	-0.3304E+00	-0.3527E+01	0.9638E+00	0.9638E+00
29	0.2800E+00	-0.3638E+00	-0.3691E+01	0.9611E+00	0.9611E+00
30	0.2900E+00	-0.3996E+00	-0.3864E+01	0.9582E+00	0.9582E+00
31	0.3000E+00	-0.4379E+00	-0.4044E+01	0.9553E+00	0.9553E+00
1	1	1	4	<u>}</u>	

Результаты измерений входного сигнала и переменных состояния

Ho-					
мер	Время <i>t</i>	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
шага k			6 6		
1	0.0000E+00	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	-0.1000E+01
2	0.1047E+00	0.1204E+01	0.5817E+00	0.1045E+00	-0.7853E+00
3	0.2094E+00	0.1395E+01	0.1668E+00	0.2079E+00	-0.5608E+00
4	0.3142E+00	0.1574E+01	-0.2412E+00	0.3090E+00	-0.3279E+00
5	0.4189E+00	0.1739E+01	-0.6391E+00	0.4067E+00	-0.8793E-01
6	0.5236E+00	0.1890E+01	-0.1024E+01	0.5000E+00	0.1576E+00
7	0.6283E+00	0.2025E+01	-0.1392E+01	0.5878E+00	0.4071E+00
8	0.7330E+00	0.2145E+01	-0.1740E+01	0.6691E+00	0.6590E+00
9	0.8378E+00	0.2250E+01	-0.2067E+01	0.7431E+00	0.9118E+00
10	0.9425E+00	0.2339E+01	-0.2370E+01	0.8090E+00	0.1164E+01
11	0.1047E+01	0.2413E+01	-0.2645E+01	0.8660E+00	0.1413E+01
12	0.1152E+01	0.2472E+01	-0.2893E+01	0.9135E+00	0.1659E+01
13	0.1257E+01	0.2517E+01	-0.3110E+01	0.9511E+00	0.1899E+01
14	0.1361E+01	0.2547E+01	-0.3296E+01	0.9781E+00	0.2132E+01
15	0.1466E+01	0.2565E+01	-0.3450E+01	0.9945E+00	0.2356E+01
16	0.1571E+01	0.2571E+01	-0.3571E+01	0.1000E+01	0.2571E+01
17	0.1676E+01	0.2566E+01	-0.3659E+01	0.9945E+00	0.2775E+01
18	0.1780E+01	0.2550E+01	-0.3715E+01	0.9781E+00	0.2966E+01
19	0.1885E+01	0.2527E+01	-0.3738E+01	0.9511E+00	0.3145E+01
20	0.1990E+01	0.2496E+01	-0.3730E+01	0.9135E+00	0.3310E+01
21	0.2094E+01	0.2460E+01	-0.3692E+01	0.8660E+00	0.3460E+01
22	0.2199E+01	0.2420E+01	-0.3626E+01	0.8090E+00	0.3596E+01
23	0.2304E+01	0.2378E+01	-0.3533E+01	0.7431E+00	0.3716E+01
24	0.2409E+01	0.2335E+01	-0.3416E+01	0.6691E+00	0.3821E+01
25	0.2513E+01	0.2292E+01	-0.3277E+01	0.5878E+00	0.3910E+01
26	0.2618E+01	0.2252E+01	-0.3118E+01	0.5000E+00	0.3984E+01
27	0.2723E+01	0.2216E+01	-0.2943E+01	0.4067E+00	0.4043E+01
28	0.2827E+01	0.2185E+01	-0.2754E+01	0.3090E+00	0.4088E+01
29	0.2932E+01	0.2162E+01	-0.2556E+01	0.2079E+00	0.4118E+01
30	0.3037E+01	0.2147E+01	-0.2350E+01	0.1045E+00	0.4136E+01
31	0.3142E+01	0.2142E+01	-0.2142E+01	0.5359E-07	0.4142E+01

Номер шага k	Время t	$x_{l}(t)$	$x_2(t)$	$u_{1}(t)$	$u_2(t)$
1	0.0000E+00	0.1000E+01	-0.5000E+01	0.1000E+01	0.5000E+01
2	0.5236E-01	0.8511E+00	-0.4540E+01	0.9986E+00	0.4897E+01
3	0.1047E+00	0.7182E+00	-0.4101E+01	0.9945E+00	0.4796E+01
4	0.1571E+00	0.6008E+00	-0.3683E+01	0.9877E+00	0.4698E+01
5	0.2094E+00	0.4987E+00	-0.3286E+01	0.9781E+00	0.4601E+01
6	0.2618E+00	0.4112E+00	-0.2909E+01	0.9659E+00	0.4507E+01
7	0.3142E+00	0.3381E+00	-0.2552E+01	0.9511E+00	0.4415E+01
8	0.3665E+00	0.2788E+00	-0.2215E+01	0.9336E+00	0.4325E+01
9	0.4189E+00	0.2330E+00	-0.1896E+01	0.9135E+00	0.4237E+01
10	0.4712E+00	0.2002E+00	-0.1597E+01	0.8910E+00	0.4149E+01
11	0.5236E+00	0.1799E+00	-0.1316E+01	0.8660E+00	0.4063E+01
12	0.5760E+00	0.1718E+00	-0.1052E+01	0.8387E+00	0.3978E+01
13	0.6283E+00	0.1754E+00	-0.8067E+00	0.8090E+00	0.3894E+01
14	0.6807E+00	0.1902E+00	-0.5783E+00	0.7771E+00	0.3810E+01
15	0.7330E+00	0.2160E+00	-0.3669E+00	0.7431E+00	0.3727E+01
16	0.7854E+00	0.2521E+00	-0.1721E+00	0.7071E+00	0.3644E+01
17	0.8378E+00	0.2983E+00	0.6404E-02	0.6691E+00	0.3561E+01
18	0.8901E+00	0.3540E+00	0.1690E+00	0.6293E+00	0.3477E+01
19	0.9425E+00	0.4188E+00	0.3159E+00	0.5878E+00	0.3394E+01
20	0.9948E+00	0.4923E+00	0.4475E+00	0.5446E+00	0.3310E+01
21	0.1047E+01	0.5741E+00	0.5642E+00	0.5000E+00	0.3224E+01
22	0.1100E+01	0.6637E+00	0.6661E+00	0.4540E+00	0.3138E+01
23	0.1152E+01	0.7607E+00	0.7537E+00	0.4067E+00	0.3051E+01
24	0.1204E+01	0.8647E+00	0.8271E+00	0.3584E+00	0.2962E+01
25	0.1257E+01	0.9753E+00	0.8868E+00	0.3090E+00	0.2872E+01
26	0.1309E+01	0.1092E+01	0.9330E+00	0.2588E+00	0.2780E+01
27	0.1361E+01	0.1214E+01	0.9660E+00	0.2079E+00	0.2686E+01
28	0.1414E+01	0.1342E+01	0.9861E+00	0.1564E+00	0.2590E+01
29	0.1466E+01	0.1474E+01	0.9935E+00	0.1045E+00	0.2492E+01
30	0.1518E+01	0.1611E+01	0.9887E+00	0.5234E-01	0.2391E+01
31	0.1571E+01	0.1752E+0	0.9718E+00	0.2679E-07	0.2288E+01
		1		•	

Но- мер шага	Время <i>t</i>	$x_{l}(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
1	0.0000E+00	-0.1000E+01	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00
2	0.8333E-01	-0.9130E+00	0.1084E+01	0.1090E+01	0.9365E-01
3	0.1667E+00	-0.8179E+00	0.1168E+01	0.1194E+01	0.2075E+00
4	0.2500E+00	-0.7137E+00	0.1255E+01	0.1310E+01	0.3410E+00
5	0.3333E+00	-0.5993E+00	0.1344E+01	0.1438E+01	0.4933E+00
6	0.4167E+00	-0.4737E+00	0.1437E+01	0.1578E+01	0.6639E+00
7	0.5000E+00	-0.3359E+00	0.1534E+01	0.1729E+01	0.8518E+00
8	0.5833E+00	-0.1851E+00	0.1635E+01	0.1891E+01	0.1056E+01
9	0.6667E+00	-0.2046E-01	0.1741E+01	0.2063E+01	0.1277E+01
10	0.7500E+00	0.1589E+00	0.1851E+01	0.2244E+01	0.1512E+01
11	0.8333E+00	0.3538E+00	0.1966E+01	0.2435E+01	0.1762E+01
12	0.9167E+00	0.5649E+00	0.2086E+01	0.2634E+01	0.2025E+01
13	0.1000E+01	0.7930E+00	0.2210E+01	0.2841E+01	0.2301E+01
14	0.1083E+01	0.1039E+01	0.2337E+01	0.3057E+01	0.2589E+01
15	0.1167E+01	0.1303E+01	0.2468E+01	0.3281E+01	0.2887E+01
16	0.1250E+01	0.1586E+01	0.2601E+01	0.3511E+01	0.3196E+01
17	0.1333E+01	0.1888E+01	0.2736E+01	0.3750E+01	0.3514E+01
18	0.1417E+01	0.2211E+01	0.2872E+01	0.3995E+01	0.3842E+01
19	0.1500E+01	0.2554E+01	0.3007E+01	0.4247E+01	0.4177E+01
20	0.1583E+01	0.2919E+01	0.3142E+01	0.4507E+01	0.4519E+01
21	0.1667E+01	0.3306E+01	0.3274E+01	0.4773E+01	0.4869E+01
22	0.1750E+01	0.3715E+01	0.3402E+01	0.5046E+01	0.5225E+01
23	0.1833E+01	0.4147E+01	0.3525E+01	0.5327E+01	0.5586E+01
24	0.1917E+01	0.4603E+01	0.3641E+01	0.5614E+01	0.5953E+01
25	0.2000E+01	0.5083E+01	0.3749E+01	0.5909E+01	0.6325E+01
26	0.2083E+01	0.5588E+01	0.3848E+01	0.6212E+01	0.6702E+01
27	0.2167E+01	0.6118E+01	0.3935E+01	0.6522E+01	0.7083E+01
28	0.2250E+01	0.6675E+01	0.4008E+01	0.6841E+01	0.7469E+01
29	0.2333E+01	0.7259E+01	0.4066E+01	0.7168E+01	0.7858E+01
30	0.2417E+01	0.7870E+01	0.4107E+01	0.7503E+01	0.8252E+01
31	0.2500E+01	0.8509E+01	0.4129E+01	0.7848E+01	0.8650E+01

Результаты измерений входного сигнала и переменных состояния
Номер					
шага	Время t	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_{l}(t)$	$u_2(t)$
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	-0.2000E+01	-0.4000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.5236E-01	-0.1902E+01	-0.3905E+01	-0.1598E+00	-0.5419E-01
3	0.1047E+00	-0.1817E+01	-0.3828E+01	-0.3251E+00	-0.1120E+00
4	0.1571E+00	-0.1746E+01	-0.3770E+01	-0.4959E+00	-0.1735E+00
5	0.2094E+00	-0.1686E+01	-0.3729E+01	-0.6722E+00	-0.2387E+00
6	0.2618E+00	-0.1639E+01	-0.3705E+01	-0.8539E+00	-0.3075E+00
7	0.3142E+00	-0.1604E+01	-0.3698E+01	-0.1041E+01	-0.3800E+00
8	0.3665E+00	-0.1580E+01	-0.3708E+01	-0.1234E+01	-0.4561E+00
9	0.4189E+00	-0.1568E+01	-0.3733E+01	-0.1432E+01	-0.5359E+00
10	0.4712E+00	-0.1566E+01	-0.3775E+01	-0.1636E+01	-0.6193E+00
11	0.5236E+00	-0.1575E+01	-0.3831E+01	-0.1845E+01	-0.7064E+00
12	0.5760E+00	-0.1594E+01	-0.3903E+01	-0.2060E+01	-0.7971E+00
13	0.6283E+00	-0.1624E+01	-0.3989E+01	-0.2280E+01	-0.8915E+00
14	0.6807E+00	-0.1663E+01	-0.4091E+01	-0.2505E+01	-0.9896E+00
15	0.7330E+00	-0.1712E+01	-0.4206E+01	-0.2736E+01	-0.1091E+01
16	0.7854E+00	-0.1770E+01	-0.4336E+01	-0.2973E+01	-0.1197E+01
17	0.8378E+00	-0.1838E+01	-0.4480E+01	-0.3215E+01	-0.1306E+01
18	0.8901E+00	-0.1914E+01	-0.4638E+01	-0.3463E+01	-0.1418E+01
19	0.9425E+00	-0.2000E+01	-0.4810E+01	-0.3716E+01	-0.1535E+01
20	0.9948E+00	-0.2094E+01	-0.4996E+01	-0.3974E+01	-0.1655E+01
21	0.1047E+01	-0.2197E+01	-0.5195E+01	-0.4238E+01	-0.1778E+01
22	0.1100E+01	-0.2308E+01	-0.5408E+01	-0.4508E+01	-0.1906E+01
23	0.1152E+01	-0.2427E+01	-0.5635E+01	-0.4783E+01	-0.2037E+01
24	0.1204E+01	-0.2554E+01	-0.5876E+01	-0.5063E+01	-0.2171E+01
25	0.1257E+01	-0.2690E+01	-0.6130E+01	-0.5349E+01	-0.2309E+01
26	0.1309E+01	-0.2833E+01	-0.6398E+01	-0.5640E+01	-0.2451E+01
27	0.1361E+01	-0.2984E+01	-0.6680E+01	-0.5937E+01	-0.2597E+01
28	0.1414E+01	-0.3142E+01	-0.6976E+01	-0.6240E+01	-0.2746E+01
29	0.1466E+01	-0.3308E+01	-0.7286E+01	-0.6548E+01	-0.2899E+01
30	0.1518E+01	-0.3481E+01	-0.7611E+01	-0.6861E+01	-0.3056E+01
31	0.1571E+01	-0.3662E+01	-0.7950E+01	-0.7180E+01	-0.3216E+01
1	1	1	1	1	

Ho-					
мер	Brevg t	$\mathbf{r}(t)$	$\mathbf{r}(t)$	11 (t)	n (t)
шага			*2(1)	<i>u</i> 1(<i>t</i>)	u ₂ (.)
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	-0.6667E+00	-0.2000E+01	0.1000E+01	0.3333E+00
2	0.5236E-01	-0.7923E+00	-0.2158E+01	0.8415E+00	0.2796E+00
3	0.1047E+00	-0.9244E+00	-0.2318E+01	0.6802E+00	0.2231E+00
4	0.1571E+00	-0.1062E+01	-0.2478E+01	0.5158E+00	0.1637E+00
5	0.2094E+00	-0.1204E+01	-0.2637E+01	0.3483E+00	0.1015E+00
6	0.2618E+00	-0.1349E+01	-0.2794E+01	0.1775E+00	0.3633E-01
7	0.3142E+00	-0.1497E+01	-0.2948E+01	0.3388E-02	-0.3177E-01
8	0.3665E+00	-0.1647E+01	-0.3097E+01	-0.1742E+00	-0.1029E+00
9	0.4189E+00	-0.1798E+01	-0.3242E+01	-0.3554E+00	-0.1770E+00
10	0.4712E+00	-0.1950E+01	-0.3381E+01	-0.5403E+00	-0.2541E+00
11	0.5236E+00	-0.2100E+01	-0.3513E+01	-0.7290E+00	-0.3344E+00
12	0.5760E+00	-0.2250E+01	-0.3638E+01	-0.9215E+00	-0.4177E+00
13	0.6283E+00	-0.2397E+01	-0.3754E+01	-0.1118E+01	-0.5042E+00
14	0.6807E+00	-0.2542E+01	-0.3862E+01	-0.1318E+01	-0.5939E+00
15	0.7330E+00	-0.2683E+01	-0.3961E+01	-0.1523E+01	-0.6868E+00
16	0.7854E+00	-0.2822E+01	-0.4051E+01	-0.1732E+01	-0.7829E+00
17	0.8378E+00	-0.2956E+01	-0.4131E+01	-0.1945E+01	-0.8822E+00
18	0.8901E+00	-0.3085E+01	-0.4202E+01	-0.2162E+01	-0.9847E+00
19	0.9425E+00	-0.3210E+01	-0.4262E+01	-0.2384E+01	-0.1091E+01
20	0.9948E+00	-0.3329E+01	-0.4313E+01	-0.2610E+01	-0.1200E+01
21	0.1047E+01	-0.3443E+01	-0.4354E+01	-0.2840E+01	-0.1312E+01
22	0.1100E+01	-0.3552E+01	-0.4386E+01	-0.3075E+01	-0.1428E+01
23	0.1152E+01	-0.3655E+01	-0.4408E+01	-0.3315E+01	-0.1547E+01
24	0.1204E+01	-0.3753E+01	-0.4422E+01	-0.3559E+01	-0.1670E+01
25	0.1257E+01	-0.3845E+01	-0.4427E+01	-0.3808E+01	-0.1796E+01
26	0.1309E+01	-0.3932E+01	-0.4425E+01	-0.4061E+01	-0.1925E+01
27	0.1361E+01	-0.4014E+01	-0.4415E+01	-0.4320E+01	-0.2058E+01
28	0.1414E+01	-0.4090E+01	-0.4399E+01	-0.4583E+01	-0.2194E+01
29	0.1466E+01	-0.4162E+01	-0.4377E+01	-0.4851E+01	-0.2333E+01
30	0.1518E+01	-0.4230E+01	-0.4351E+01	-0.5123E+01	-0.2476E+01
31	0.1571E+01	-0.4294E+01	-0.4320E+01	-0.5401E+01	-0.2623E+01
1			1	1	1

Результаты измерений входного сигнала и переменных состояния

Ho-					
мер	BDEMS t	$\mathbf{r}_{\mathbf{r}}(t)$	$\mathbf{x}_{2}(t)$	$y_{i}(t)$	$u_{r}(t)$
шага	openn i		~2(0)		••2(•)
<u>k</u>					
1	0.0000E+00	-0.1698E+01	-0.3498E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.1047E+00	-0.2205E+01	-0.4255E+01	-0.1157E+00	-0.4222E-01
3	0.2094E+00	-0.2763E+01	-0.5069E+01	-0.2533E+00	-0.9906E-01
4	0.3142E+00	-0.3370E+01	-0.5936E+01	-0.4129E+00	-0.1705E+00
5	0.4189E+00	-0.4024E+01	-0.6854E+01	-0.5943E+00	-0.2566E+00
6	0.5236E+00	-0.4725E+01	-0.7818E+01	-0.7978E+00	-0.3573E+00
7	0.6283E+00	-0.5468E+01	-0.8822E+01	-0.1023E+01	-0.4726E+00
8	0.7330E+00	-0.6251E+01	-0.9861E+01	-0.1270E+01	-0.6026E+00
9	0.8378E+00	-0.7070E+01	-0.1093E+02	-0.1540E+01	-0.7471E+00
10	0.9425E+00	-0.7919E+01	-0.1201E+02	-0.1831E+01	-0.9063E+00
11	0.1047E+01	-0.8793E+01	-0.1311E+02	-0.2144E+01	-0.1080E+01
12	0.1152E+01	-0.9685E+01	-0.1420E+02	-0.2479E+01	-0.1269E+01
13	0.1257E+01	-0.1059E+02	-0.1527E+02	-0.2836E+01	-0.1472E+01
14	0.1361E+01	-0.1149E+02	-0.1633E+02	-0.3215E+01	-0.1689E+01
15	0.1466E+01	-0.1239E+02	-0.1734E+02	-0.3615E+01	-0.1922E+01
16	0.1571E+01	-0.1327E+02	-0.1829E+02	-0.4038E+01	-0.2169E+01
17	0.1676E+01	-0.1413E+02	-0.1917E+02	-0.4483E+01	-0.2430E+01
18	0.1780E+01	-0.1494E+02	-0.1996E+02	-0.4949E+01	-0.2706E+01
19	0.1885E+01	-0.1571E+02	-0.2064E+02	-0.5438E+01	-0.2997E+01
20	0.1990E+01	-0.1641E+02	-0.2120E+02	-0.5948E+01	-0.3302E+01
21	0.2094E+01	-0.1703E+02	-0.2161E+02	-0.6481E+01	-0.3622E+01
22	0.2199E+01	-0.1755E+02	-0.2186E+02	-0.7035E+01	-0.3957E+01
23	0.2304E+01	-0.1797E+02	-0.2192E+02	-0.7611E+01	-0.4306E+01
24	0.2409E+01	-0.1827E+02	-0.2178E+02	-0.8210E+01	-0.4670E+01
25	0.2513E+01	-0.1844E+02	-0.2143E+02	-0.8830E+01	-0.5049E+01
26	0.2618E+01	-0.1845E+02	-0.2083E+02	-0.9472E+01	-0.5442E+01
27	0.2723E+01	-0.1830E+02	-0.1998E+02	-0.1014E+02	-0.5850E+01
28	0.2827E+01	-0.1797E+02	-0.1886E+02	-0.1082E+02	-0.6272E+01
29	0.2932E+01	-0.1745E+02	-0.1747E+02	-0.1153E+02	-0.6709E+01
30	0.3037E+01	-0.1674E+02	-0.1578E+02	-0.1226E+02	-0.7161E+01
31	0.3142E+01	-0.1581E+02	-0.1381E+02	-0.1301E+02	-0.7627E+01
1	1				

Ho-	3 5 <u>5</u> 11 5 11				
мер	Brover t	$\mathbf{r}_{i}(t)$	$\mathbf{r}_{-}(t)$	u(t)	$\eta_{i}(t)$
шага	премя г	$\lambda_1(t)$	*2(*)	<i>u</i> 1(<i>i</i>)	<i>u</i> ₂ (<i>r</i>)
k	- <u>1</u>				
1	0.0000E+00	0.1486E+01	0.4861E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.5236E-01	0.1083E+01	-0.3963E-01	-0.5513E-01	-0.1929E-01
3	0.1047E+00	0.6630E+00	-0.5679E+00	-0.1159E+00	-0.4228E-01
4	0.1571E+00	0.2303E+00	-0.1092E+01	-0.1824E+00	-0.6902E-01
5	0.2094E+00	-0.2091E+00	-0.1605E+01	-0.2548E+00	-0.9957E-01
6	0.2618E+00	-0.6495E+00	-0.2100E+01	-0.3333E+00	-0.1340E+00
7	0.3142E+00	-0.1086E+01	-0.2572E+01	-0.4180E+00	-0.1722E+00
8	0.3665E+00	-0.1512E+01	-0.3015E+01	-0.5090E+00	-0.2144E+00
9	0.4189E+00	-0.1923E+01	-0.3423E+01	-0.6065E+00	-0.2606E+00
10	0.4712E+00	-0.2315E+01	-0.3792E+01	-0.7106E+00	-0.3109E+00
11	0.5236E+00	-0.2682E+01	-0.4117E+01	-0.8214E+00	-0.3652E+00
12	0.5760E+00	-0.3021E+01	-0.4396E+01	-0.9390E+00	-0.4236E+00
13	0.6283E+00	-0.3327E+01	-0.4625E+01	-0.1064E+01	-0.4861E+00
14	0.6807E+00	-0.3598E+01	-0.4803E+01	-0.1195E+01	-0.5529E+00
15	0.7330E+00	-0.3832E+01	-0.4928E+01	-0.1334E+01	-0.6239E+00
16	0.7854E+00	-0.4025E+01	-0.5001E+01	-0.1481E+01	-0.6991E+00
17	0.8378E+00	-0.4178E+01	-0.5020E+01	-0.1634E+01	-0.7787E+00
18	0.8901E+00	-0.4288E+01	-0.4988E+01	-0.1795E+01	-0.8626E+00
19	0.9425E+00	-0.4357E+01	-0.4907E+01	-0.1964E+01	-0.9508E+00
20	0.9948E+00	-0.4384E+01	-0.4779E+01	-0.2141E+01	-0.1043E+01
21	0.1047E+01	-0.4371E+01	-0.4608E+01	-0.2325E+01	-0.1141E+01
22	0.1100E+01	-0.4319E+01	-0.4397E+01	-0.2517E+01	-0.1242E+01
23	0.1152E+01	-0.4232E+01	-0.4152E+01	-0.2717E+01	-0.1348E+01
24	0.1204E+01	-0.4112E+01	-0.3878E+01	-0.2925E+01	-0.1459E+01
25	0.1257E+01	-0.3962E+01	-0.3580E+01	-0.3141E+01	-0.1573E+01
26	0.1309E+01	-0.3787E+01	-0.3264E+01	-0.3366E+01	-0.1693E+01
27	0.1361E+01	-0.3591E+01	-0.2938E+01	-0.3598E+01	-0.1817E+01
28	0.1414E+01	-0.3379E+01	-0.2606E+01	-0.3838E+01	-0.1946E+01
29	0.1466E+01	-0.3156E+01	-0.2277E+01	-0.4087E+01	-0.2079E+01
30	0.1518E+01	-0.2926E+01	-0.1957E+01	-0.4344E+01	-0.2217E+01
31	0.1571E+01	-0.2697E+01	-0.1652E+01	-0.4609E+01	-0.2359E+01
1		1			

Но- мер	Время <i>t</i>	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$u_1(t)$	$u_2(t)$
k					
1	0.0000E+00	0.5000E+01	0.3000E+01	-0.2000E+01	0.0000E+00
2	0.5236E-01	0.4882E+01	0.2736E+01	-0.1780E+01	0.1045E+00
3	0.1047E+00	0.4737E+01	0.2467E+01	-0.1540E+01	0.2079E+00
4	0.1571E+00	0.4568E+01	0.2197E+01	-0.1284E+01	0.3090E+00
5	0.2094E+00	0.4376E+01	0.1925E+01	-0.1014E+01	0.4067E+00
6	0.2618E+00	0.4162E+01	0.1654E+01	-0.7321E+00	0.5000E+00
7	0.3142E+00	0.3928E+01	0.1385E+01	-0.4425E+00	0.5878E+00
8	0.3665E+00	0.3676E+01	0.1120E+01	-0.1480E+00	0.6691E+00
9	0.4189E+00	0.3409E+01	0.8603E+00	0.1480E+00	0.7431E+00
10	0.4712E+00	0.3128E+01	0.6078E+00	0.4425E+00	0.8090E+00
11	0.5236E+00	0.2835E+01	0.3638E+00	0.7321E+00	0.8660E+00
12	0.5760E+00	0.2534E+01	0.1300E+00	0.1014E+01	0.9135E+00
13	0.6283E+00	0.2226E+01	-0.9241E-01	0.1284E+01	0.9511E+00
14	0.6807E+00	0.1915E+01	-0.3019E+00	0.1540E+01	0.9781E+00
15	0.7330E+00	0.1602E+01	-0.4974E+00	0.1780E+01	0.9945E+00
16	0.7854E+00	0.1290E+01	-0.6776E+00	0.2000E+01	0.1000E+01
17	0.8378E+00	0.9810E+00	-0.8416E+00	0.2198E+01	0.9945E+00
18	0.8901E+00	0.6785E+00	-0.9884E+00	0.2372E+01	0.9781E+00
19	0.9425E+00	0.3843E+00	-0.1117E+01	0.2520E+01	0.9511E+00
20	0.9948E+00	0.1008E+00	-0.1228E+01	0.2641E+01	0.9135E+00
21	0.1047E+01	-0.1697E+00	-0.1319E+01	0.2732E+01	0.8660E+00
22	0.1100E+01	-0.4253E+00	-0.1391E+01	0.2794E+01	0.8090E+00
23	0.1152E+01	-0.6639E+00	-0.1444E+01	0.2825E+01	0.7431E+00
24	0.1204E+01	-0.8839E+00	-0.1477E+01	0.2825E+01	0.6691E+00
25	0.1257E+01	-0.1084E+01	-0.1492E+01	0.2794E+01	0.5878E+00
26	0.1309E+01	-0.1261E+01	-0.1487E+01	0.2732E+01	0.5000E+00
27	0.1361E+01	-0.1417E+01	-0.1464E+01	0.2641E+01	0.4067E+00
28	0.1414E+01	-0.1548E+01	-0.1424E+01	0.2520E+01	0.3090E+00
29	0.1466E+01	-0.1654E+01	-0.1367E+01	0.2372E+01	0.2079E+00
30	0.1518E+01	-0.1736E+01	-0.1295E+01	0.2198E+01	0.1045E+00
31	0.1571E+01	-0.1792E+01	-0.1208E+01	0.2000E+01	0.5359E-07

Формирование балльной оценки

N⁰	Этап задания	Оценка,
п/п		баллы
1	Задание п. 1	5
2	Задание п. 2	3
3	Задание п. 3	2
	Итого	10

Литература

1. Черепанов О.И. Идентификация и диагностика систем. Пособие и задания на вычислительный практикум для самостоятельной работы студентов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. – 96 с.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте задачу идентификации.

2. Перечислите методы идентификации.

3. Поясните переход от непрерывной модели объекта к дискретной.

4. Перечислите и поясните основные этапы метода максимального правдоподобия.

5. Перечислите и поясните основные этапы метода последовательной регрессии.

6. Перечислите и поясните основные этапы метода стохастической аппроксимации.