

# Содержание

Введение	6
<b>1 Структура комплекса и решаемые им задачи</b>	<b>7</b>
<b>2 Инициализация параметров динамической модели</b>	<b>11</b>
<b>3 Инициализация начального состояния динамической модели</b>	<b>11</b>
3.1 В задачах “Фазовые портреты”, “Точечные отображения”, “Бифуркационные диаграммы” . . . . .	11
3.1.1 Алгоритм “Задать начальное состояние” . . . . .	12
3.1.2 Алгоритм “Фиксировать начальное состояние” . . . . .	12
3.1.3 Алгоритм “Начальное состояние на выходящей сепаратрисе седлового состояния равновесия” . . . . .	12
3.1.4 Алгоритм “Набор начальных состояний” . . . . .	14
3.2 В задачах “Периодические движения”, “Бифуркационная кривая”, “Ляпуновские характеристические показатели”, “Спектры” . . . . .	17
3.3 В задаче “Состояния равновесия” (Режим настройка) . . . . .	17
3.4 В задаче “Сепаратрисные связки” (Режим настройка) . . . . .	18
<b>4 Инициализация программных модулей</b>	<b>20</b>
4.1 Параметры счета . . . . .	20
4.1.1 Модуль “Фазовые портреты” . . . . .	20
4.1.2 Модуль “Точечные отображения” . . . . .	21
4.1.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы” . . . . .	22
4.1.4 Модуль “Периодические движения-1” . . . . .	23
<i>а) Определение плоскости активных параметров</i> . . . . .	23
<i>б) Задание параметров счета</i> . . . . .	23
4.1.5 Модуль “Периодические движения-2” . . . . .	24
<i>а) Определение плоскости активных параметров</i> . . . . .	24
<i>б) Задание параметров цикличности фазовых координат</i> . . . . .	24
<i>в) Задание параметров счета</i> . . . . .	24
4.1.6 Модуль “Бифуркационная кривая” . . . . .	25
4.1.7 Модуль “Состояния равновесия –1” . . . . .	26
4.1.8 Модуль “Состояния равновесия –2” . . . . .	26
4.1.9 Модуль “Ляпуновские характеристические показатели” . . . . .	27
4.1.10 Модуль “Спектры” . . . . .	27
<i>а) Параметры формирования временной реализации</i> . . . . .	27

б) Параметры расчета спектра . . . . .	27
в) Параметры расчета автокорреляционной функции	27
4.1.11 Модуль “Сепаратрисные связки-1” . . . . .	28
4.1.12 Модуль “Сепаратрисные связки-2” . . . . .	28
4.2 Параметры графических областей изображений . . . . .	29
4.2.1 Модуль “Фазовые портреты” . . . . .	29
4.2.2 Модуль “Точечные отображения” . . . . .	30
4.2.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы” . . . . .	31
4.2.4 Модуль “Периодические движения” . . . . .	31
4.2.5 Модуль “Сепаратрисные связки” . . . . .	31
4.2.6 Модуль “Спектр” . . . . .	31
4.3 Масштабирование . . . . .	31
4.3.1 Модули “Фазовые портреты” и “Точечные отображения” . . . . .	31
4.3.2 Модуль “Бифуркационные диаграммы” . . . . .	32
4.4 Параметры секущей плоскости . . . . .	32
<b>5 Режим “Счет”</b>	<b>32</b>
5.1 Модуль “Фазовые портреты” . . . . .	33
5.2 Модуль “Точечные отображения” . . . . .	34
5.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы” . . . . .	34
5.3.1 Счет . . . . .	34
5.3.2 Продолжение счета . . . . .	36
5.4 Модуль “Периодические движения” . . . . .	37
5.4.1 Счет . . . . .	37
5.4.2 Движение по параметру . . . . .	39
5.5 Модуль “Бифуркационная кривая” . . . . .	40
5.6 Модуль “Состояния равновесия -1” . . . . .	40
5.7 Модуль “Состояния равновесия -2” . . . . .	41
5.8 Модуль “Ляпуновские характеристические показатели” . . . . .	41
5.9 Модуль “Спектры” . . . . .	42
5.9.1 Формирование временной реализации . . . . .	42
5.9.2 Расчет и рисование спектра(автокорреляционной функции) . . . . .	43
5.9.3 Рисование спектра или автокорреляционной функции	43
5.9.4 Преобразования файла реализации . . . . .	44
5.10 Модуль “Сепаратрисные связки-1” . . . . .	44
5.11 Модуль “Сепаратрисные связки-2” . . . . .	44
<b>6 Сервисные программы</b>	<b>45</b>
6.1 Сохранение графического экрана в файле в формате РСХ	45

6.2	Определение физических координат точки в графическом окне изображений . . . . .	45
6.3	Архив результатов . . . . .	46
6.4	Оптимизация файла результатов бифуркационной диаграммы . . . . .	49
6.5	Создание программных модулей . . . . .	49
<b>Список литература</b>		<b>53</b>

## Введение

В последние годы предметом пристального внимания специалистов из самых различных областей науки и техники являются нелинейные динамические модели, обладающие сложным поведением. Необходимость исследования таких моделей стимулируется как общенаучными проблемами, связанными с познанием закономерностей нелинейных процессов и явлений и их использованием в современных технологиях, так и многочисленными прикладными задачами проектирования сложных объектов и систем. В силу ограниченных возможностей аналитических и качественных методов исследования все более важное место в изучении конкретных нелинейных систем занимают компьютерное моделирование.

Данная работа знакомит читателя с программным комплексом “Динамика нелинейных систем” (ДНС), предназначенного для проведения численных экспериментов с динамическими моделями в виде систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Комплекс ДНС является развитием созданного ранее комплекса “Динамика СФС” [1], характерной особенностью которого является способность изучать фазовые траектории систем с цилиндрическим фазовым пространством. При разработке и реализации этой программной системы использован опыт, накопленный при моделировании нелинейных объектов и разработке алгоритмов и программных средств качественно-численного исследования процессов динамики нелинейных систем [2-6]. В качестве методического обеспечения при создании комплекса ДНС использовались методы качественной теории и теории бифуркаций динамических систем в сочетании с численными методами и алгоритмами исследования нелинейной динамики. При этом применялись как известные способы, алгоритмы и вычислительные процедуры [7-17], так и развитые специально для моделей с циклическими координатами. В качестве характеристик движений моделей используются временные реализации решений, фазовые портреты и проекции фазовых портретов аттракторов, картины точечного отображения, однопараметрические бифуркационные диаграммы, мультипликаторы периодических движений, ляпуновские показатели, спектры мощности и автокорреляционные функции.

Данная разработка имеет цель ознакомить студентов с современными подходами компьютерного исследования сложных динамических систем, оказать помощь в анализе математических моделей реальных физических и технических объектов с использованием методов нелинейного анализа и моделирования. При этом основной упор делается на использование комплекса в качестве эффективного средства обучения навыкам самостоятельной исследовательской работы.

# 1 Структура комплекса и решаемые им задачи

Программный комплекс “Динамика нелинейных систем” (ДНС) позволяет проводить качественно-численное исследование динамических моделей, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений зависящих от параметров. Максимальная размерность систем  $N=10$ , а число параметров  $N_{par}=20$ . Изучение нелинейных моделей базируется на методах теории колебаний и предусматривает решение динамических задач, представленных в табл.1.

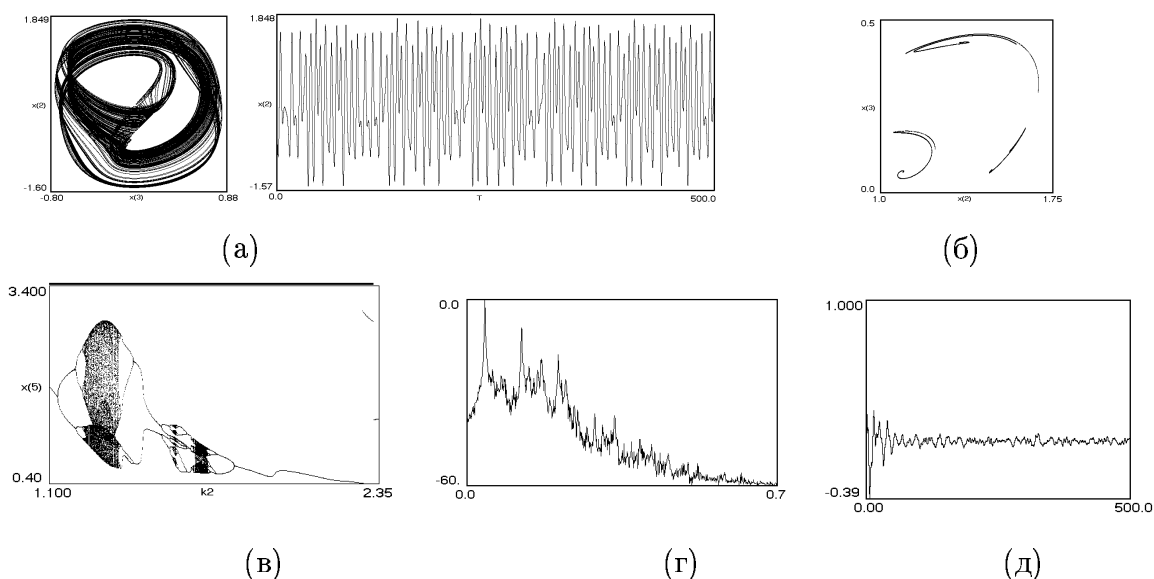


Рис. 1:

Решение каждой из выше перечисленных задач осуществляется отдельным программным модулем, настроенным на исследование конкретной динамической модели. Создание и настройка программных модулей на конкретную модель осуществляется по правилам, описанным в разделе (см. разд. 6.5) настоящего руководства. Программные модули ДНС могут функционировать как независимо друг от друга, так и быть объединены в единый комплекс с помощью программы Start.exe, входящей в состав комплекса. При работе с программными модулями комплекса ДНС инициализация параметров модели и решаемой задачи осуществляется с помощью пользовательского интерфейса, реализующего принцип диалогового меню. Интерфейс пользователя содержит два типа меню. Первый тип меню предназначен для ввода цифровой или текстовой информации, второй – меню “ветвления”.

Меню для ввода цифровой информации (рис.2) имеет заголовок и содержит поля идентификаторов параметров, значений и комментариев. Исследователю предоставляется возможность вносить изменения только в поле значений параметров, при этом он должен действовать по следующим правилам.

Назначение	Модуль	Программа
Построение двумерных проекций фазовых портретов и временных реализаций динамических систем с непрерывным временем (рис.1а)	Фазовые портреты	1.exe
Построение отображения Пуанкаре, порождаемого фазовыми траекториями системы обыкновенных дифференциальных уравнений (рис.1б)	Точечные отображения	2.exe
Построение однопараметрических бифуркационных диаграмм отображения Пуанкаре (рис.1в)	Бифуркационные диаграммы	3.exe
Поиск предельных циклов и вычисление их характеристик (периода и мультипликаторов), исследование эволюции предельных циклов при изменении параметров динамической модели	Периодические движения-1, Периодические движения-2	4.exe, 5.exe
Поиск в пространстве параметров динамических систем координат точек кривой, отвечающей бифуркациям периодических движений	Бифуркационная кривая	6.exe
Поиск на плоскости параметров динамической системы координат точек кривой, отвечающей бифуркациям состояний равновесия	Состояния равновесия-1, Состояния равновесия-2	7.exe, 8.exe
Вычисление ляпуновских характеристических показателей на решениях динамической модели	Ляпуновские характеристические показатели	9.exe
Вычисление спектра мощности (рис.1г) и корреляционной функции (рис.1д) процесса, определяемого решениями динамической модели	Спектры	10.exe
Поиск в пространстве параметров двумерных динамических систем координат точек бифуркационных кривых, соответствующих совпадению сепаратрис седловых состояний равновесия	Сепаратрисные связки-1, Сепаратрисные связки-2	12.exe, 13.exe

Таблица 1: Задачи решаемые комплексом ДНС

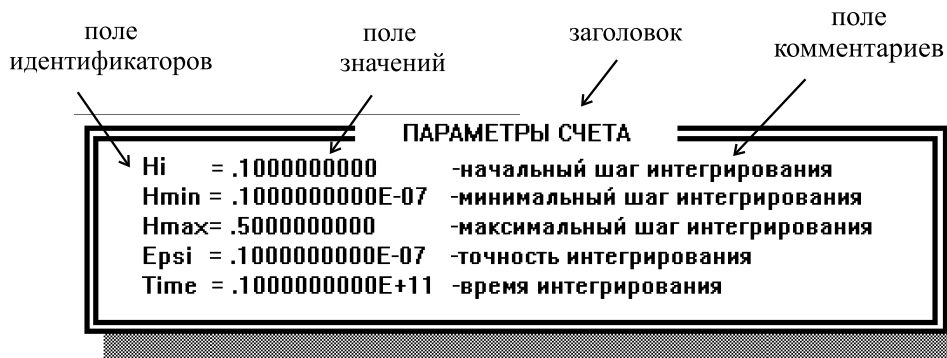


Рис. 2: Вид меню для ввода цифровой информации

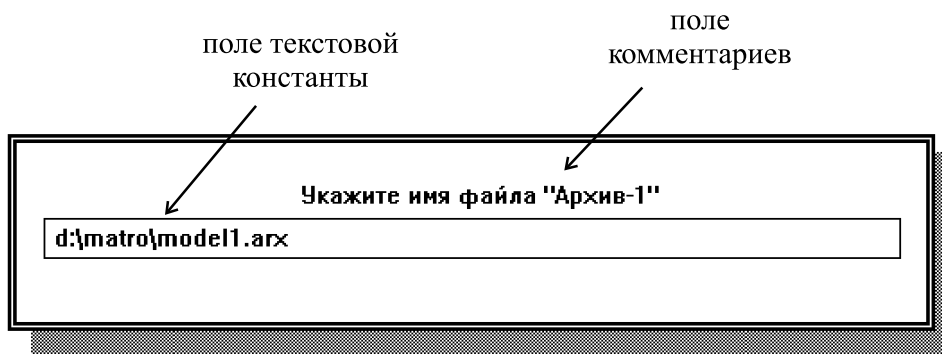


Рис. 3: Вид меню для ввода текстовой информации

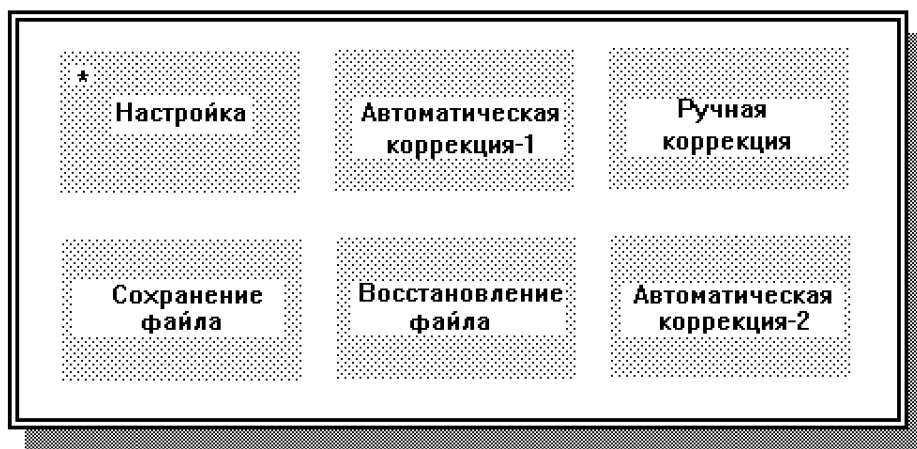
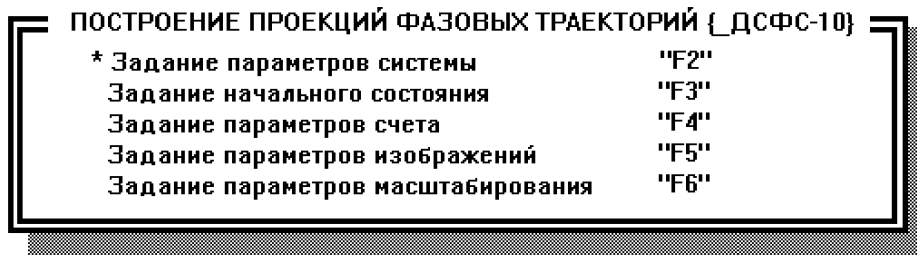


Рис. 4: Виды меню типа "ветвления"

Клавишами горизонтального перемещения курсора выбирается параметр, значение которого необходимо изменить. При этом строка, в которой производятся изменения, выделяется другим цветом (оттенком), а изменяемый символ - миганием. Выбор изменяемого символа осуществляется клавишами горизонтального перемещения курсора. После коррекции числа изменения фиксируются нажатием клавиши Enter. Выход из локального меню осуществляется нажатием клавиши Esc, а при необходимости быстрого перехода в другое меню - нажатием соответствующей функциональной клавиши. Информация о функциональных клавишах содержится либо в поле комментариев, либо в строке помощи, расположенной в верхней части экрана.

*Замечание 1.* При фиксации внесенных изменений воспринимаются символы, стоящие до первого пробела справа.

*Замечание 2.* При записи действительного числа допустима запись в виде десятичного числа, за которым следует порядок, например 35.1E-5; 35.1e-5; 35.1D-53; 5.1d-5

*Замечание 3.* Если необходимо задать значение параметра, являющееся числом  $\pi=3.1415926\dots$  или результатом выполнения над ним операций деления (умножения) на некоторое число, то это значение может быть записано в следующей форме:  $\pi/a$  ( $\pi^*A$ ), например, число  $2\pi$  в виде  $\pi^*2.$ , а  $-\pi/2$  в виде  $-\pi/2$ .

*Замечание 4.* Наличие звукового сигнала при фиксации внесенных изменений свидетельствует о наличии ошибок в форме представления числа.

Меню ввода текстовой информации (рис.3), включает поле для ввода текстовой информации и поле комментариев, содержащее информацию о назначении текстовой константы. Исследователь может вводить текстовую константу длиной до 51 символа.

Меню "ветвления" (рис.4) обеспечивают различные пути развития диалога при инициализации модели и задачи. Меню содержат перечень функций или действий, которые можно выполнить из данной точки диалога. Процесс выбора необходимого пункта в меню ветвления (выбранный пункт помечается звездочкой) осуществляется с помощью клавиш горизонтального и вертикального перемещения курсора с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием соответствующей функциональной клавиши. Информацию о соответствии функциональных клавиш строкам меню содержат либо сами меню, либо строка помощи, расположенная в верхней части экрана.

Интерфейс пользователя состоит из главного меню, которое выполняет функции диспетчера при настройке программного модуля на процесс решения динамической задачи, и локальных меню, с помощью которых непосредственно осуществляется настройка. Структура пользова-



тельского интерфейса (главного меню) зависит от решаемой динамической задачи, однако, в ней всегда присутствуют локальные меню для инициализации параметров и начального состояния динамической модели.

Ниже следующие разделы настоящего руководства содержат правила инициализации динамической модели и программных модулей, описание результатов решения динамических задач и дополнительных возможностей, предоставляемых комплексом при качественно-численном исследовании динамических моделей.

## **2 Инициализация параметров динамической модели**

Инициализация (задание) значений параметров исследуемой модели осуществляется через локальное меню “Задание параметров системы”, выход на которое осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F2.

**Дополнительные возможности.** При работе с программными модулями: “Фазовые портреты”, “Точечные отображения”, “Бифуркационные диаграммы” в режимах <Счет> или <Задание начального состояния> по алгоритму “Начальное состояние на сепаратрисе”, “Сепаратрисные связки” в режиме <Графическое изображение>, “Периодические движения” в режиме <Счет> по алгоритму “Изображение”, “Состояния равновесия” в режиме <Настройка> предусмотрена дополнительная возможность изменения значений параметров модели с помощью функциональных клавиш. Инструкции по использованию этого режима содержат соответствующие разделы настоящего руководства.

## **3 Инициализация начального состояния динамической модели**

### **3.1 В задачах “Фазовые портреты”, “Точечные отображения”, “Бифуркационные диаграммы”**

В задачах “Фазовые портреты”, “Точечные отображения”, “Бифуркационные диаграммы” инициализация начального состояния модели осуществляется через локальное меню “Задание начальных состояний”. Для определения начальных значений фазовых переменных следует войти в локальное меню “Задание начальных состояний” либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F3. Далее клавишами

горизонтального перемещения курсора нужно выбрать необходимый алгоритм задания начальных состояний и нажать клавишу Enter, после чего продолжить формирование начальных состояний согласно принятому алгоритму. Программа предусматривает следующие четыре алгоритма формирования начальных состояний: *задать начальное состояние, фиксировать начальное состояние, начальное состояние на выходящей сепаратрисе седлового состояния равновесия, набор начальных состояний.*

### **3.1.1 Алгоритм “Задать начальное состояние”**

По этому алгоритму исследователь задает координаты начального состояния динамической системы в фазовом пространстве. Характерная особенность этого алгоритма состоит в том, что в результате работы модулей в режиме <Счет> координаты начального состояния постоянно изменяются, принимая значения текущих координат изображающей точки на фазовой траектории. Поэтому при выходе из режима <Счет> начальные условия перемещаются в конечную точку фазовой траектории.

### **3.1.2 Алгоритм “Фиксировать начальное состояние”**

Алгоритм позволяет зафиксировать начальные условия динамической системы и, таким образом, перейти к изучению фазовой траектории с фиксированными начальными условиями. Для закрепления начальных условий необходимо построить фазовую траекторию с начальными условиями, которые необходимо зафиксировать, после чего перейти в локальное меню “Задание начальных состояний”, где с помощью клавиш вертикального перемещения курсора выбрать строку “Фиксировать начальное состояние” и нажать клавишу Enter.

*Замечание 1.* Режим фиксации начальных условий позволяет восстанавливать “испорченные” начальные условия, при работе алгоритмов “Задать начальное состояние” и “Набор начальных состояний”.

*Замечание 2.* При восстановлении начальных состояний режим “Автоматическая коррекция-2” изменяется на режим “Автоматическая коррекция-1”.

### **3.1.3 Алгоритм “Начальное состояние на выходящей сепаратрисе седлового состояния равновесия”**

Этот алгоритм позволяет задавать начальное состояние динамической системы на собственном векторе седлового состояния. При выборе этого

алгоритма на экране высвечиваются параметры определения координат седлового состояния равновесия методом Ньютона: исходные значения фазовых координат  $x(1), x(2), \dots$ , являющиеся начальным приближением для поиска седлового состояния равновесия, точность нахождения состояния равновесия ( $E_{psc}$ ), величина сдвига по выходящему вектору ( $E_{psu}$ ). При необходимости скорректируйте высвечиваемые параметры и нажмите клавишу F1. При этом программа начинает поиск координат состояний равновесия, и в случае успешного завершения этого процесса на экране высвечиваются координаты, собственные числа и векторы найденного состояния равновесия.

Если параметры найденного состояния равновесия Вас удовлетворяют, тогда используя клавиши PageUp, PageDown и -(минус), выберите необходимый собственный вектор ( $i$ -ый собственный вектор отвечает  $i$ -ому собственному числу) и нажмите клавишу Enter. В результате этого программа вычислит координаты точки на выбранной сепаратрисе и возвратится в локальное меню “Задание начальных состояний”.

Если параметры найденного состояния равновесия Вас не удовлетворяют, тогда вернитесь на этап поиска состояния равновесия нажатием клавиши Esc. Повторите этап поиска состояния равновесия, изменив начальное приближение.

Если процесс поиска состояния равновесия заканчивается безрезультатно, то программа возвращается на этап задания начального приближения и параметров счета.

*Дополнительные возможности.* При успешном нахождении состояния равновесия модели (после того как на экране высвечиваются координаты, собственные числа и векторы найденного состояния равновесия) в программе предусмотрена возможность изучения зависимостей характеристик (координат, собственных чисел и векторов) найденного состояния равновесия от параметров модели. Для перехода в этот режим необходимо нажать комбинацию клавиш  $\langle \text{Alt}, \text{F2} \rangle$ .

После нажатия комбинации клавиш  $\langle \text{Alt}, \text{F2} \rangle$  программа переключается в режим изучения состояния равновесия, в котором предоставляет возможность изменять значения активных параметров с последующим пересчетом характеристик найденного состояния равновесия. В режиме корректировки параметров модели в первой строке экрана высвечиваются идентификаторы и значения активных параметров модели. В программе предусмотрена возможность изменения с постоянным шагом двух активных параметров. Идентификаторы активных параметров и шаг изменения их значений определяются при задании параметров счета. Изменение значений и идентификаторов активных параметров, шагов их изменения, а также возврат на один шаг назад при движении по параметру может

быть осуществлен непосредственно в режиме корректировки параметров модели с помощью функциональных клавиш заведомо табл.2

Клавиши	Действие
Ctrl,F1	Изменение идентификатора 1-го активного параметра
Ctrl,F2	Изменение идентификатора 2-го активного параметра
→ , ←	Изменение значений 1-го активного параметра
↑ , ↓	Изменение значений 2-го активного параметра
Delete	Уменьшение в 10 раз шага изменения 1-го активного параметра
Insert	Увеличение в 10 раз шага изменения 1-го активного параметра
Page Down	Уменьшение в 10 раз шага изменения 2-го активного параметра
Page Up	Увеличение в 10 раз шага изменения 2-го активного параметра
Home	Возврат на один шаг по измененному параметру

Таблица 2: Назначение функциональных клавиш в режиме изменения активных параметров

Выход из режима корректировки параметров модели осуществляется при нажатии клавиши Esc.

### 3.1.4 Алгоритм “Набор начальных состояний”

Этот алгоритм используется для одновременного изображения на экране дисплея нескольких траекторий, построенных при различных начальных условиях. Для назначения данного алгоритма в качестве способа задания начальных состояний выберите соответствующую строку локального меню “Задание начальных состояний” и нажмите клавишу Enter. Далее выберите один из пунктов данного алгоритма: “Настройка”, “Автоматическая коррекция-1”, “Автоматическая коррекция-2”, “Ручная коррекция”, “Сохранение файла”, “Восстановление файла”и зафиксируйте его нажатием клавиши Enter.

**Настройка.** Задание данного пункта алгоритма позволяет сформировать временный файл начальных состояний, содержащий информацию о начальных условиях построения траекторий. При этом начальное состояние, принадлежащее устойчивому или неустойчивому многообразию состояния равновесия, будем называть “начальное состояние в окрестности особой точки”, а все остальные “начальное состояние в неособой точке”.

Формирование очередной записи создаваемого временного файла начальных состояний начинается с выбора алгоритма задания начальных состояний. С помощью клавиш горизонтального (вертикального) перемещения курсора выберите имя одного из вариантов задания начальных состояний: “Начальное состояние в окрестности особой точки” или “Начальное состояние в неособой точке” и зафиксируйте его нажатием клавиши Enter.

*Начальное состояние в окрестности особой точки.* При выборе данного алгоритма во временный файл начальных состояний заносятся записи, содержащие информацию, необходимую для построения фазовых траекторий, принадлежащих устойчивым или неустойчивым многообразиям состояний равновесия (особых точек). Формирование таких начальных условий осуществляется аналогично заданию начального состояния на входящей сепаратрисе седлового состояния равновесия. После того, как начальные условия в окрестности особой точки заданы, на экране дисплея высвечивается таблица, содержащая значения параметров построения траектории. Значение параметра  $I_{cp}$  определяет цвет, которым будет рисоваться траектория, значение параметра  $Time_i$  определяет время интегрирования этой траектории. Введите значения параметров построения траектории и нажмите клавишу F1 либо Esc.

При нажатии клавиши F1 начальные условия и параметры построения траектории заносятся в очередную запись временного файла начальных состояний, этот процесс сопровождается сообщением номера записи (IZ) и типа точки (“особая”, “неособая”). При нажатии Esc запись во временный файл не производится, управление передается на начало формирования очередной записи создаваемого временного файла начальных состояний.

*Начальное состояние в неособой точке.* При выборе данного варианта задания начального состояния на экране дисплея высвечивается таблица с заголовком “Параметры траектории”, содержащая поля для задания начальных условий и параметров построения фазовой траектории. Параметрами построения траектории являются: время интегрирования этой траектории ( $Time_i$ ); действительный признак ( $Z_h$ ), характеризующий направление интегрирования –  $Z_h=1$  соответствует интегрированию в прямом времени, а  $Z_h=-1$  – в обратном; цвет ( $I_{cp}$ ), которым должна рисоваться данная траектория. Внесите необходимые изменения в значения параметров и фазовых координат и далее нажмите клавишу F1. При нажатии клавиши F1 значения параметров интегрирования и значения фазовых координат заносятся в очередную запись временного файла начальных состояний. Процесс формирования очередной записи временного файла сопровождается сообщением номера записи (IZ) и типа точки.

**Автоматическая коррекция-1.** При задании пункта алгоритма “Автоматическая коррекция-1” программа автоматически обновляет те записи, созданного в режиме “Настройка” временного файла начальных состояний, которые формировались по алгоритму “Начальное состояние в окрестности особой точки”. При этом в качестве начального приближения при поиске седлового состояния равновесия программа использует координаты состояния равновесия, найденные на предыдущем шаге, а в качестве определяющего вектора выбирает вектор, составляющий острый угол с определяющим вектором, найденным на предыдущем шаге. Записи, сформированные по алгоритму “Начальное состояние в окрестности неособой точки”, не корректируются.

*Замечание.* Если во временном файле начальных состояний к моменту выбора пункта алгоритма “Автоматическая коррекция-1” записей нет, программа передает управление на пункт алгоритма “Настройка”.

**Автоматическая коррекция-2.** При задании пункта алгоритма “Автоматическая коррекция-2” программа обновляет все записи созданного при “Настройке” или “Автоматической коррекции-1” временного файла начальных состояний, помещая в  $j$ -ую запись файла начальных состояний значения фазовых координат  $j$ -ой траектории на момент прекращения ее построения в режиме “Счет” ( $j$ -ая траектория - траектория с начальными условиями из  $j$ -ой записи файла начальных состояний). При этом все начальные условия становятся “неособыми”.

**Ручная коррекция.** Данный пункт алгоритма дает возможность просматривать содержание временного файла начальных состояний, вносить изменения в записи, корректируя начальные состояния и параметры построения траектории, вычеркивать ненужные и добавлять новые записи.

При выборе режима “Ручная коррекция” на экране появляется таблица, отражающая информацию  $i$ -ой записи файла начальных состояний: тип (особая, неособая) и координаты точки, время интегрирования (Time $i$ ), цвет фазовой траектории (значение признака Isp), а также значение признака Zh, характеризующего направление интегрирования фазовой траектории (Zh=1 – в прямом, Zh=-1 – в обратном времени). Просмотр записей файла осуществляется с помощью клавиш F1 и F2. При просмотре все параметры записи могут быть скорректированы. Однако, при этом следует учитывать, что изменение признака интегрирования Zh и координат “особой” точки приводит к тому, что эта точка становится “неособой”. Внесенные в запись изменения фиксируются нажатием клавиши F3. Удаление записи осуществляется путем нажатия клавиши F4.

При выборе режима "Добавить запись" программа переходит на пункт алгоритма "Настройка", который функционирует в режиме формирования очередной записи. Выход из режима "Ручная коррекция" осуществляется по нажатию клавиши Esc.

*Замечание.* Если во временном файле начальных состояний к моменту выбора пункта алгоритма "Ручная коррекция" записей нет, программа передает управление на пункт алгоритма "Настройка".

**Сохранение файла.** Данный пункт алгоритма реализует возможность сохранения созданного временного файла начальных состояний в файле на диске. Имя файла, в котором сохраняется информация, вводится исследователем по запросу системы после выбора пункта "Сохранение файла".

**Восстановление файла.** Данный пункт алгоритма позволяет формировать временный файл начальных состояний путем извлечения информации из файла начальных состояний, сохраненного ранее на диске. Имя файла, где хранится информация, вводится исследователем по запросу системы после выбора пункта "Восстановление файла".

### **3.2 В задачах "Периодические движения", "Бифуркационная кривая", "Ляпуновские характеристические показатели", "Спектры"**

В задачах "Периодические движения", "Бифуркационная кривая", "Ляпуновские характеристические показатели", "Спектры" определение начального состояния динамической модели осуществляется по алгоритму "Задать начальное состояние" (см. разд. 3.1.1).

### **3.3 В задаче "Состояния равновесия" (Режим настройка)**

В задаче "Состояния равновесия" начальное состояние должно быть определено в точке состояния равновесия, бифуркация которого ищется. Этот процесс реализуется в меню "Настройка", вход в которое осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4.

При входе в режим "Настройка" на экране дисплея появляется таблица, содержащая следующие поля: координаты состояния равновесия, собственные числа (характеристические показатели) и один из собственных векторов. В колонке "координаты" задайте начальное приближение искомого состояния равновесия и нажмите клавишу F1. При этом программа

Клавиши	Действие
F2	Выход на изменение значений параметров модели
F3	Выход на изменение параметров счета
F5	Выход на режим "Счет"
F6	Выход на "Счет" в режиме "Движение по параметру" (Только для программного модуля "Состояния равновесия -1")

Таблица 3: Назначение функциональных клавиш модулей "Состояния равновесия" в режиме "Настройка"

начинает поиск координат состояния равновесия и, в случае успешного завершения этого процесса, на экране высвечиваются координаты, характеристические показатели и один из векторов найденного состояния. Если параметры найденного состояния равновесия Вас удовлетворяют, используя клавиши PageUp, PageDown, установите номер собственного числа, значение которого переходит через ноль (нумерация собственных чисел осуществляется сверху вниз, номер собственного вектора, отображаемого на экране, совпадает с номером выбранного собственного числа).

Выход из меню "Настройка" осуществляется нажатием Esc или по функциональным клавишам (см. табл.3).

*Дополнительные возможности.* При успешном нахождении состояния равновесия модели (после того как на экране высвечиваются координаты, собственные числа и векторы найденного состояния равновесия) в программе предусмотрена возможность изучения зависимостей характеристик (координат, собственных чисел и векторов) найденного состояния равновесия от параметров модели. Для перехода в этот режим необходимо нажать комбинацию клавиш <Alt,F2>. Инструкцию работы в режиме изучения состояния равновесия содержит раздел (см. разд. 3.1.3).

### 3.4 В задаче "Сепаратрисные связки" (Режим настройка)

В задаче "Сепаратрисные связки" инициализация начального состояния состоит в определении сепаратрис, совпадение которых ищется. Этот процесс реализуется в меню "Настройка". Вход в меню "Настройка" осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4. Настройка включает в себя три этапа: определение сепаратрис, совпадение которых ищется (этап 1,2), и задание трансверсальной прямой, которую сепаратрисы пересекают (этап 3). Каждому



этапу соответствует таблица, которую необходимо заполнить. Переход от одного этапа к другому осуществляется клавишей табуляции.

Клавиши	Действие
F2	Выход на изменение значений параметров модели
F3	Выход на изменение параметров счета
F5	Выход на режим "Счет"
F6	Выход на "Счет" в режиме "Движение по параметру" (Только для программного модуля "Сепаратрисные связки-1")
F7	Сохранение параметров настройки. Данный пункт реализует возможность сохранения параметров настройки (параметров модели и сепаратрис, коэффициентов секущей прямой) в файле на диске
F8	Восстановление параметров настройки. Данный пункт реализует возможность восстановления сохраненных ранее параметров настройки из файла на диске
F9	Переход на режим "Графическое изображение", позволяющий визуально контролировать правильность настройки и бифуркационные изменения фазового пространства при варьировании параметров модели.

Таблица 4: Назначение функциональных клавиш модулей "Сепаратрисные связки" в режиме "Настройка"

**Этап 1,2.** Таблица для определения сепаратрис включает: значения координат состояния равновесия, собственных чисел (характеристических показателей) и компонент одного из собственных векторов. В колонке "координаты" задайте начальное приближение седлового состояния равновесия, сепаратрису которого необходимо построить, и нажмите клавишу F1. При этом программа начинает поиск координат состояний равновесия и, в случае успешного завершения этого процесса, на экране высвечиваются координаты, собственные числа и один из векторов найденного состояния. Если параметры найденного состояния равновесия Вас удовлетворяют, используя клавиши <Page Up>, <Page Down> и <Shift,->, выберите необходимый собственный вектор (1-й собственный вектор отвечает выходящей сепаратрисе, а 2-й – входящей).

**Этап 3.** Таблица для определения трансверсальной прямой содержит коэффициенты секущей прямой, которая задается уравнением  $a_1x_1 + a_2x_2 + a_3=0$ . Задайте коэффициенты  $a_1, a_2, a_3$  прямой через определение соответствующих идентификаторов PL(1), PL(2), PL(3).

Выход из меню "Настройка" осуществляется нажатием Esc или по функциональным клавишам (см. табл.4).

## 4 Инициализация программных модулей

Инициализация программных модулей включает определение параметров счета, параметров графических областей изображений, диапазонов изменения проектируемых фазовых координат (масштабирование), задание секущей плоскости в соответствии с таб.5.

Модуль	параметры счета	параметры графической области	масштаби- рование	параметры секущей плоскости
Фазовые портреты	*	*	*	
Точечные отображения	*	*	*	*
Бифуркационные диаграммы	*	*	*	*
Периодические движения	*	*		*
Бифуркационная кривая	*			*
Состояния равновесия	*			
Ляпуновские характеристические показатели	*			
Спектры	*	*	*	
Сепаратрисные связи	*	*	*	*

Таблица 5: Этапы инициализации программных модулей

### 4.1 Параметры счета

#### 4.1.1 Модуль “Фазовые портреты”

При компьютерном изучении фазовых траекторий динамических систем основной процедурой является численное интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений – математической модели исследуемого объекта. В комплексе ДНС интегрирование осуществляется

методом Рунге-Кутты четвертого порядка с контролем точности, основанном на экстраполяции Ричардсона [17], при этом накладываются ограничения на диапазон изменения шага интегрирования. Таким образом параметрами счета при построении фазовых траекторий являются параметры численного интегрирования: начальный ( $H_i$ ), минимальный ( $H_{min}$ ), максимальный ( $H_{max}$ ) шаги интегрирования, точность ( $Epsi$ ), интервал интегрирования фазовой траектории ( $Time$ ). Определение параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета”, выход на которое осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4. С помощью меню “Задание параметров счета” могут быть также определены начальные значения вспомогательных параметров – параметров интерактивного режима: номера ( $Ia1, Ia2$ ) активных параметров модели и шаги ( $Hr1, Hr2$ ) их изменения.

#### 4.1.2 Модуль “Точечные отображения”

Параметрами счета в программе построения проекций отображения Пуанкаре являются: параметры численного интегрирования (см. разд. 4.1.1); параметры построения отображения Пуанкаре: номер циклической координаты ( $Iparc$ ) и ее период ( $Parc$ ), число итераций отображения ( $Niter$ ), признак отображения ( $It$ ), кратность отображения ( $Ikr$ ), а также вспомогательные параметры: номера ( $Ia1, Ia2$ ) активных параметров модели и шаги ( $Hr1, Hr2$ ) их изменения.

Как известно, отображение последования Пуанкаре получается в результате пересечения траекторией  $L$  исследуемой динамической системы некоторой плоскости вида  $\Sigma = \{x : h(x - x_\Sigma) = 0\}$ , где  $h$  – вектор, нормальный к плоскости  $\Sigma$ , а  $x_\Sigma$  – некоторая точка, лежащая на этой плоскости. Плоскость  $\Sigma$  делит пространство состояний на две области:  $D^+ = \{x : h(x - x_\Sigma) > 0\}$  и  $D^- = \{x : h(x - x_\Sigma) < 0\}$ . Если плоскость выбрана правильно, исследуемая траектория будет пересекать плоскость  $\Sigma$ , переходя из области  $D^-$  в область  $D^+$ , а затем из области  $D^+$  в область  $D^-$  и т.д. Последовательность переходов из области  $D^-$  в область  $D^+$  также, как и последовательность переходов из области  $D^+$  в область  $D^-$ , определяет некоторое отображение. Указанные отображения принято называть односторонними отображениями последования Пуанкаре, поскольку они охватывают только те пересечения, которые происходят лишь с одной стороны плоскости  $\Sigma$ . Вся последовательность точек пересечения плоскости безотносительно к направлениям перехода из одной области в другую определяет так называемое двустороннее отображение Пуанкаре.

Признак отображения  $It=-1$  определяет одностороннее отображение, получающееся в результате перехода траектории  $L$  из области  $D^-$  в область  $D^+$ ;  $It=1$  – отображение, которое получается в результате перехода траектории  $L$  из области  $D^+$  в область  $D^-$ ;  $It=0$  для построения двустороннего отображения. Признак  $Ikr$  задает кратность отображения, т.е. на экране будут отображаться только те точки отображения, для которых выполняется условие  $i \bmod(Ikr)=0$ , где  $i$  текущий номер точки при построении отображения. Параметры  $Iparc$  и  $Parc$  принимают нулевые значения ( $Iparc=0, Parc=0$ ), если динамическая система не содержит циклических координат.

Определение параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета”, выход на которое осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4.

### 4.1.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы”

Параметрами счета в программе построения бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре являются: параметры численного интегрирования (см. разд. 4.1.1); параметры построения точечного отображения: номер циклической координаты ( $Iparc$ ) и ее период ( $Parc$ ), признак отображения - одностороннее или двустороннее ( $It$ ) (см. разд. 4.1.2), число итераций отображения, соответствующее переходному процессу при смене значения варьируемого параметра ( $Niust$ ), шаг изменения варьируемого параметра ( $Npar$ ), число итераций отображения ( $Niter$ ); параметры графических областей изображений; диапазоны изменения активного параметра и фазовых координат.

Шаг изменения варьируемого параметра должен удовлетворять неравенству  $Npar < (Par_{max} - Par_{min}) / Ng$ , где  $(Par_{min}, Par_{max})$  -интервал изменения варьируемого параметра,  $Ng$  -величина окна бифуркационной диаграммы по горизонтали, измеряемая в пикселах. Если, находясь в локальном меню “Задание параметров счета”, нажать клавишу F4, то программа автоматически вычислит шаг изменения варьируемого параметра по формуле  $Npar=(Par_{max} - Par_{min})/Ng$ . При этом значения  $Par_{max}$ ,  $Par_{min}$ ,  $Ng$  к моменту вычисления  $Npar$  должны быть определены:  $Par_{max}$ ,  $Par_{min}$  - в локальном меню “Задание параметров масштабирования” (F6),  $Ng$  -в локальном меню “Задание параметров изображений” (F5).

Изменения значений параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета”, которое вызывается либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажа-

тием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4.

#### 4.1.4 Модуль “Периодические движения-1”

Инициализация программного модуля состоит в определении плоскости активных параметров и задании параметров счета.

*Задание плоскости активных параметров.* В процессе счета, в целях повышения оперативности исследования, из всех параметров предусмотрено изменение только двух. Эти два параметра называются “активными” и определяют плоскость активных параметров исследуемой системы. Для определения активных параметров войдите в локальное меню “Выбор плоскости активных параметров” путем выбора соответствующей строки в меню “Инициализация программного модуля” с последующим нажатием клавиши Enter. В результате этого на экране высветится таблица, содержащая идентификаторы активных параметров. Клавишами F1 и F2 установите идентификаторы активных параметров. Выход из режима определения плоскости активных параметров исследуемой системы осуществляется клавишей Enter.

*Дополнительные возможности.* Идентификаторы активных параметров могут быть изменены в режиме <Счет> после выхода из алгоритмов “Итерации” и “Ньютон” при помощи функциональных клавиш. Нажатие комбинации <Ctrl,F1> приводит к изменению идентификатора первого активного параметра, а <Ctrl,F2> – второго.

*Задание параметров счета.* Программа реализует два алгоритма поиска координат неподвижных точек отображения Пуанкаре [7]: метод простой итерации и метод Ньютона. Поэтому параметрами счета в программном модуле “Периодические движения-1” являются: точность нахождения координат точки на цикле ( $\epsilon_{psc}$ ), интервал интегрирования ( $Time_i$ ), кратность цикла ( $I_{kr}$ ), признак задания секущей плоскости ( $I_{pl}$ ) и признак печати ( $I_{pr}$ ). Признак  $I_{pl}$  определяет алгоритм задания секущей плоскости, он может принимать значения  $I_{pl}=0$ , что соответствует алгоритму автоматического задания секущей, и  $I_{pl}=1$  – коэффициенты секущей плоскости определяются исследователем. Признак  $I_{pr}$  характеризует объем информации, выдаваемой на экран дисплея по результатам счета, он может принимать значения 0,1,2,3. Выход на изменение значений параметров счета осуществляется путем выбора соответствующей строки в меню “Инициализация программного модуля” с последующим нажатием клавиши Enter.

#### 4.1.5 Модуль “Периодические движения-2”

Инициализация программного модуля состоит в определении плоскости активных параметров, параметров цикличности фазовых координат и задании параметров счета.

*Задание плоскости активных параметров* осуществляется также как и в программном модуле “Периодические движения-1”.

*Задание параметров цикличности фазовых координат.* Параметрами цикличности фазовых координат исследуемой системы являются периоды и минимальные значения циклических координат. Если фазовая координата не является циклической, то ее период задается равными нулю. Параметры цикличности фазовых координат исследуемой системы определяются в локальном меню “Параметры цикличности координат”, выход на которое осуществляется путем выбора соответствующей строки в меню “Инициализация программного модуля” с последующим нажатием клавиши Enter. Выход из локального меню “Параметры цикличности координат” осуществляется нажатием клавиши Esc.

*Задание параметров счета.* Программа реализует два алгоритма поиска координат неподвижных точек отображения Пуанкаре: метод простой итерации и метод Ньютона. Программа поиска предельного цикла методом Ньютона позволяет находить неподвижные точки отображения Пуанкаре любой устойчивости, но фиксированной кратности. Реализация этого метода выполнена аналогично тому, как это сделано в [7, 13]. При реализации метода простой итерации использован модифицированный алгоритм, который позволяет находить устойчивые и вполне неустойчивые неподвижные точки отображения Пуанкаре не только фиксированной кратности (как, например, в [7]), но и кратности из заданного диапазона возможных ее значений. Такой подход оказывается весьма эффективным в тех случаях, когда по внешнему виду предельного цикла трудно определить его истинную кратность. Таким образом, параметрами счета в программном модуле “Периодические движения-2” являются: параметры численного интегрирования; номер циклической координаты (Iparc) и ее период (Pparc); кратность отображения (Ikr); признак задания секущей плоскости (Ipl); точность нахождения координат неподвижной точки (Epsp); минимальная (Kmin) и максимальная (Kmax) кратность неподвижной точки при поиске алгоритмом “Итерации”; максимальное число итераций отображения при поиске неподвижной точки (Niter). Выход на изменение значений параметров счета осуществляется путем выбора соответствующей строки в меню “Инициализация программного модуля” с последующим нажатием клавиши Enter.

#### 4.1.6 Модуль “Бифуркационная кривая”

Инициализация программного модуля состоит в определении параметров цикличности фазовых координат и задании параметров счета. Так как программа реализует алгоритм поиска бифуркационных кривых предельных циклов методом движения по кривой [8, 9], то параметрами счета в программе являются: тип бифуркационной кривой ( $I_{bif}$ ), число ( $N_{ap}$ ) и номера ( $Ap_1, Ap_2, Ap_3$ ) активных параметров, максимальный шаг движения по бифуркационной кривой ( $H_{rmax}$ ), точность нахождения бифуркационной кривой ( $E_{psk}$ ), начальный шаг движения по бифуркационной кривой ( $H_i$ ), точность интегрирования ( $E_{psi}$ ), признак  $I_{pr}$ , характеризующий степень вывода промежуточной информации при вычислении бифуркационной кривой, кратность неподвижной точки ( $I_{kr}$ ), признак задания секущей плоскости ( $I_{pl}$ ), номер ( $I_c$ ) циклической координаты и ее период ( $P_{erc}$ ).

Тип бифуркационной кривой однозначно определяет число активных параметров  $N_{ap}$  и задается числовым значением признака  $I_{bif}$  в соответствии с таб.6

Значение $I_{bif}$	Бифуркации	Значение $N_{ap}$
0	кривая грубых периодических решений,	1
1	кривая периодических решений с мультипликатором <b>+1</b>	2
2	кривая нейтральных периодических решений	2
3	кривая периодических решений с мультипликатором <b>-1</b>	2
11	кривая периодических решений с парой мультипликаторов <b>+1</b>	3
12	кривая периодических решений с парой мультипликаторов <b>-1</b>	3
15	кривая периодических решений с одним мультипликатором <b>+1</b> и одним <b>-1</b>	3
16	кривая периодических решений с одним мультипликатором <b>+1</b> и парой нейтральных	3
17	кривая периодических решений с одним мультипликатором <b>-1</b> и парой нейтральных	3

Таблица 6: Бифуркационные кривые модуля “Бифуркационная кривая”

Признак промежуточной печати  $I_{pr}$  может принимать значения: 0,1,2,3. Признак  $I_{pl}$  может принимать значения 0, что соответствует автомати-

ческому заданию секущей и 1, что означает задание секущей исследователем.

Параметры цикличности фазовых координат модели, номер ( $I_c$ ) циклической координаты и ее период ( $P_{\text{Per}}$ ) и признак  $I_{\text{Pl}}$  рекомендуется задавать такими же, как в программном модуле “Периодические движения”.

#### 4.1.7 Модуль “Состояния равновесия –1”

Программа реализует алгоритм поиска кривой, соответствующей переходу корня характеристического уравнения из левой полуплоскости в правую, методом половинного деления [17]. Алгоритм предусматривает поиск координат состояния равновесия методом Ньютона [17], составление характеристического уравнения и вычисление корней этого характеристического уравнения с помощью программ пакета EISPAK [10]. Поэтому параметрами счета в программе являются параметры: точность поиска состояния равновесия ( $E_{\text{Pss}}$ ), номера поискового ( $I_{\text{pf}}$ ) и варьируемого ( $I_{\text{pv}}$ ) параметров, допустимый интервал изменения поискового параметра: минимальное ( $P_{\text{min}}$ ) и максимальное ( $P_{\text{max}}$ ) значения поискового параметра, шаг изменения поискового параметра ( $H_{\text{par}}$ ), признак направления движения по параметру ( $M_{\text{оov}}$ ), который может принимать значения 1 и 2, при  $M_{\text{оov}}=1$  значение параметра увеличивается на величину  $H_{\text{par}}$ , а при  $M_{\text{оov}}=2$  - уменьшается.

Изменения значений параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета” либо путем выбора соответствующе строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F3.

#### 4.1.8 Модуль “Состояния равновесия –2”

Программа реализует алгоритм поиска бифуркационных кривых состояний равновесия методом движения по кривой [8], поэтому параметрами счета в программе являются: признак бифуркационной кривой ( $I_{\text{bif}}$ ), номера активных параметров ( $I_{\text{a1}}, I_{\text{a2}}$ ), максимальный шаг движения по бифуркационной кривой ( $H_{\text{max}}$ ), точность нахождения бифуркационной кривой ( $E_{\text{psp}}$ ), точность нахождения состояния равновесия ( $E_{\text{pss}}$ ), шаг численного дифференцирования динамической системы по параметру ( $D_{\text{h}}$ ), а также диапазоны изменения параметров модели. Диапазоны изменения параметров модели определяются через локальное меню “Диапазоны изменения параметров”, где последовательно задаются сначала нижние, а затем верхние границы изменения параметров модели. Остальные параметры счета определяются через локальное меню “Задание па-



раметров счета”. Значение параметра  $I_{bif}$  может принимать значения 1 и 2,  $I_{bif}=1$  соответствует поиску бифуркации Андронова-Хопфа, а  $I_{bif}=2$  – седло-узловой бифуркации состояния равновесия. Выход на локальные меню “Диапазоны изменения параметров” и “Задание параметров счета” осуществляется либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F3 и F4 соответственно.

#### 4.1.9 Модуль “Ляпуновские характеристические показатели”

Вычисление Ляпуновских характеристических показателей осуществляется по алгоритмам, описанным в [14, 16] поэтому параметрами счета в программе являются: параметры численного интегрирования системы ОДУ - начальный шаг интегрирования ( $H_i$ ), точность интегрирования ( $E_{psi}$ ), максимальный интервал интегрирования ( $Time_i$ ), а также время переходного процесса ( $Time_u$ ); число вычисляемых характеристических показателей ( $NR$ ) и точность их вычисления ( $E_{psi}$ ); интервал между перенормировками ( $Tr$ ).

Изменение значений параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета”, которое вызывается либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4.

#### 4.1.10 Модуль “Спектры”

##### *Формирование временной реализации*

Параметрами счета являются: фиксированный шаг интегрирования ( $H_i$ ); число точек численного интегрирования, характеризующее переходный процесс ( $N_u$ ); число точек реализации ( $N_{tr}$ ); частота выборки ( $N_{hi}$ ) - для формирования реализации используется точка на траектории, номер которой кратен  $N_{hi}$ ; номер фазовой координаты ( $K$ ), которая используется для формирования реализации. Если задать значение  $K$  отрицательным, т.е.  $K=-j$ , где  $0 < j \leq n$ ,  $n$  – размерность модели, то в файл вместо значений фазовой координаты  $x_j$  заносятся значения производной  $dx_j/dt$ .

##### *Расчет спектра[15]*

Параметрами расчета спектра являются: длина короткой реализации  $N_r$ , где  $N_r$  может принимать значения 128,256,512,1024,2048,4096; признак  $I_w$  применения сглаживающего окна, при  $I_w=1$  сглаживающая процедура применяется, а при  $I_w=0$  не применяется.

### *Расчет корреляции*

Параметром расчета автокорреляционной функции является длина временного интервала  $Nr$ , задаваемая количеством точек временной реализации ( $Nr \leq 16000$ ).

#### **4.1.11 Модуль “Сепаратрисные связки-1”**

Программа реализует алгоритм поиска кривой, соответствующей смене знака у функции расщепления сепаратрис, методом половинного деления. Алгоритм предусматривает: поиск координат состояния равновесия методом Ньютона, составление характеристического уравнения, вычисление собственных чисел (с помощью программ пакета EISPAK) и собственных векторов (методом Гаусса) характеристического уравнения, интегрирование модели [17, 10]. Поэтому параметрами счета в программе являются параметры численного интегрирования (см. разд. 4.1.1); длина собственного вектора, задающего начальную точку на сепаратрисе ( $Dist$ ); номера поискового ( $Ipf$ ) и варьируемого ( $Ipv$ ) параметров, допустимый интервал изменения поискового параметра: минимальное ( $Pmin$ ) и максимальное ( $Pmax$ ) значения поискового параметра, шаг изменения поискового параметра ( $Npar$ ), признак направления движения по параметру ( $Moov$ ), который может принимать значения 1 и 2, при  $Moov=1$  значение параметра увеличивается на величину  $Npar$ , а при  $Moov=2$  - уменьшается.

Изменения значений параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета” либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши **Enter**, либо нажатием функциональной клавиши **F4**.

#### **4.1.12 Модуль “Сепаратрисные связки-2”**

Программа реализует алгоритм поиска бифуркационной кривой методом движения по кривой [8], поэтому параметрами счета в программе являются: параметры численного интегрирования динамической системы ОДУ; длина собственного вектора, задающего начальную точку на сепаратрисе ( $Dist$ ); номера активных параметров ( $Ia1, Ia2$ ), максимальный шаг движения по бифуркационной кривой ( $Nmax$ ), точность нахождения бифуркационной кривой ( $Epsp$ ), шаг численного дифференцирования динамической системы по параметру ( $Dh$ ), признак коррекции секущей ( $Is$ ), а также диапазоны изменения параметров модели.

Значение параметра  $Is$  может принимать значения 0 и 1,  $Is=0$  означает, что секущая прямая в процессе счета не изменяется,  $Is=1$  – секущая

пересчитывается. Изменения значений параметров счета осуществляется через локальное меню “Задание параметров счета” либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F4. Переход на определение диапазонов изменения параметров модели осуществляется при выходе из меню “Задание параметров счета”, где последовательно определяются сначала минимальные, а затем максимальные возможные значения параметров модели.

## 4.2 Параметры графических областей изображений

### 4.2.1 Модуль “Фазовые портреты”

Параметрами графических областей изображений в программе построения проекций фазовых траекторий являются: размеры окон в пикселах; номера проектируемых координат (см. замечания 1,2); периоды и минимальные значения циклических проектируемых координат; параметры, определяющие число знаков и размеры символов при написании диапазонов изменения проектируемых координат; параметры графического режима (признак графического режима, определяющий черно-белый или цветной режим вывода, цвета общего фона, графического окна изображений и карандаша, а также признак размещения графических окон изображений).

Для задания параметров окон и графического режима войдите в локальное меню “Задание параметров изображений” (рис.5) либо путем выбора соответствующей строки в глобальном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F5. Далее внесите изменения, с учетом следующих правил:

- перемещение по меню осуществляется с помощью клавиш вертикального перемещения курсора;
- изменения цифровой информации фиксируется нажатием клавиши Enter;
- смена графического режима (<цветной>, <черно-белый>), а также изменение цветов общего фона, окон и карандаша осуществляется при помощи клавиши табуляции;
- размеры и расположение (задается признаком размещения) окон должно быть такое, чтобы они могли быть размещены на экране размером 640X480 пикселей без наложения друг на друга.

*Замечание 1.* Если в качестве одной из проектируемых координат необходимо указать время, то ее номер по модулю должен превышать размерность исследуемой системы ОДУ.




ПАРАМЕТРЫ ПЕРВОГО ОКНА	
(150,150)	-Размеры окна в пикселах
[ 2, 1]	-Номера проектируемых координат
6.283185307	-Период фазовой координаты по горизонтали
-3.614159265	-Минимальное значение фазовой координаты по горизонтали
6.283185307	-Период фазовой координаты по вертикали
-3.141592654	-Минимальное значение фазовой координаты по вертикали
ПАРАМЕТРЫ ВТОРОГО ОКНА	
(150,150)	-Размеры окна в пикселах
[ 1, -3]	-Номера проектируемых координат
.0000000000	-Период фазовой координаты по горизонтали
.0000000000	-Период фазовой координаты по вертикали
ПАРАМЕТРЫ ГРАФИЧЕСКОГО РЕЖИМА	
< ЦВЕТНОЙ >	
3	-Число символов при написании масштабов
4	-Размеры цифр при написании масштабов
5	-Размеры подписей
1	-Признак размещения окон /1-горизонтальн.,2-вертикальн./
ЦВЕТА :	 -общего фона.  -фона окна.  -карандаша

Рис. 5: Меню для определения графических областей изображений

*Замечание 2.* Если номер проектируемой координаты задать отрицательным, то на экран вместо значения координаты будет выводиться значение скорости изменения (производной) соответствующей координаты.

*Замечание 3.* Номера проектируемых координат могут быть изменены в режиме <Счет> с помощью функциональных клавиш (См. режим <Счет>).

#### 4.2.2 Модуль “Точечные отображения”

Параметры графических областей изображений в программе построения проекций отображения Пуанкаре определяются так же, как и в модуле “Фазовые портреты” с учетом следующих замечаний.

*Замечания.* Если в качестве проектируемых координат указать номер одной и той же координаты, то в первом окне будет выводиться функция последования указанной координаты с соединением точек, а во втором - функция последования без соединения точек.

Если задать номер проектируемой координаты, превышающий размерность исследуемой системы, то в графическом окне будет отображаться значение временного интервала между соседними пересечениями

секущей плоскости.

Если указать номер проектируемой координаты меньше нуля, то в графическом окне будет отображаться номер текущей итерации.

#### **4.2.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы”**

Параметры графических областей изображений в программе построения бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре определяются так же, как и в модуле “Точечные отображения” с учетом того, что во втором окне по горизонтали вместо номера проектируемой фазовой координаты задается номер варьируемого параметра модели.

#### **4.2.4 Модуль “Периодические движения”**

Параметры графических областей изображений определяются в модуле “Фазовые портреты”.

#### **4.2.5 Модуль “Сепаратрисные связки”**

Параметры графических областей изображений являются фиксированными.

#### **4.2.6 Модуль “Спектр”**

Параметрами изображения являются: размер графической области в пикселях, где рисуется спектр (корреляционная функция); параметры графического режима: признак графического режима  $I_{gr}$ , определяющий черно-белый ( $I_{gr}=0$ ) или цветной ( $I_{gr}=1$ ) режим вывода, признаки цвета общего фона, графического окна изображений и карандаша; параметры, определяющие число знаков и размеры символов при написании диапазонов изменения переменных; признак масштабирования  $I_{mas}$ , который определяет режим автоматического масштабирования ( $I_{mas}=0$ ) или режим масштабирования исследователем ( $I_{mas}=1$ ). Инициализация параметров изображения осуществляется через локальное меню “Параметры изображения”, которое появляется на экране дисплея при выходе на режимы рисования спектра или автокорреляционной функции, после определения имени файла “Спектр” (“Автокорреляция”).

### **4.3 Масштабирование**

#### **4.3.1 Модули “Фазовые портреты” и “Точечные отображения”**

Процесс масштабирования заключается в определении диапазонов изменения проектируемых координат, необходимых для вычисления мас-

штабных множителей преобразования действительных значений фазовых координат в дискретные координаты пикселей экрана. Определение параметров масштабирования осуществляется через локальное меню “Масштабирование”, которое вызывается либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F6. Диапазоны изменения проектируемых координат могут быть изменены по результатам интегрирования фазовой траектории в режиме <Счет> (см.режим Счет).

#### 4.3.2 Модуль “Бифуркационные диаграммы”

Процесс масштабирования в программе построения бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре заключается в определении диапазонов изменения проектируемых координат и варьируемого параметра. Определение параметров масштабирования осуществляется через локальное меню “Масштабирование”, которое вызывается либо путем выбора соответствующей строки в главном меню с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием функциональной клавиши F6.

#### 4.4 Параметры секущей плоскости

Секущая плоскость определяется уравнением:  $h_1x_1 + h_2x_2 + \dots + h_nx_n + h_{n+1} = 0$ . Программа предусматривает два способа задания секущей плоскости:

*Автоматически* ( $|p|=0$ ) - при этом секущая плоскость задается таким образом, что она проходит через начальную точку интегрирования исходной системы, смещенную на величину периода вдоль циклической координаты, и ортогонально касательному вектору к траектории в этой точке.

*Пользователем* ( $|p|=1$ ) - в этом случае секущая плоскость определяется пользователем путем задания коэффициентов  $h_i$ , где  $i = 1, n + 1$  ( $n$ -порядок исследуемой модели,  $h_i \sim PL(i)$ ).

### 5 Режим “Счет”

Работа модулей в режиме “Счет” требует предварительного определения параметров и начального состояния исследуемой модели и инициализации программного модуля в соответствии с табл.5.

## 5.1 Модуль “Фазовые портреты”

Выход на режим “Счет” осуществляется через главное меню, путем выбора строки “Начало счета” с последующим нажатием клавиши Enter. При выходе на режим “Счет” дисплей переводится в графический режим, на экране высвечиваются графические области(окна) изображений, в которых изображаются проекции фазовых траекторий. Процесс построения фазовых траекторий продолжается до истечения времени интегрирования (Time), определенного пользователем либо при задании параметров счета, либо при формировании набора начальных состояний.

Процесс построения фазовых траекторий может быть прерван до истечения времени интегрирования по функциональным клавишам в соответствии с табл.7.

Клавиши	Действие
F1	Обновление графической области изображений. В результате нажатия этой клавиши происходит очистка графической области изображений (окон), текущие значения времени интегрирования и счетчика итераций обнуляются, процесс интегрирования и отображения результатов продолжается
F2	Выход на изменение значений параметров системы
F3	Выход на изменение начальных состояний
F4	Выход на изменение параметров построения фазовых траекторий
F5	Выход на изменение параметров графических областей изображений: количество окон, их размеры и расположение на экране, вид и размеры подписей, цветовая палитра изображений, номера проектируемых координат
F6	Выход на масштабирование: определение диапазонов изменения проектируемых фазовых координат
F7 <sup>a</sup>	Выход на задание секущей плоскости
Esc	Прекращение построения фазовых траекторий с выходом либо на построение следующей траектории из набора начальных состояний, либо в главное меню

<sup>a</sup>Только для модулей “Точные отображения” и “Бифуркационные диаграммы”.

Таблица 7: Назначение функциональных клавиши в режиме "Счет"

При выходе из графического режима по функциональным клавишам F2–F6 возврат на режим “Счет” из локального меню осуществляется нажатием клавиши Esc. При этом перед входом в графический режим про-

водится коррекция начальных состояний и диапазонов изменения проектируемых фазовых координат согласно определенным ранее алгоритмам.

В режиме “Счет” предусмотрены возможности изменения параметров модели и счета с помощью функциональных клавиш (см. табл.2 и табл.8).

## **5.2 Модуль “Точечные отображения”**

Выход на режим “Счет” осуществляется через главное меню, путем выбора строки “Начало счета” с последующим нажатием клавиши Enter. При выходе на режим “Счет” дисплей переводится в графический режим, на экране высвечиваются графические области (окна) изображений, в которых изображаются проекции отображения Пуанкаре. Процесс построения отображения Пуанкаре продолжается до тех пор, пока число точек отображения не превысит число итераций (Niter), определенных пользователем при задании параметров счета.

Процесс построения отображения Пуанкаре может быть прерван пользователем нажатием функциональных клавиш в соответствии с табл.7. При выходе из графического режима по функциональным клавишам F2–F7 возврат на режим “Счет” из локального меню осуществляется нажатием клавиши Esc. При этом перед входом в графический режим проводится коррекция начальных состояний и диапазонов изменения проектируемых фазовых координат согласно определенным ранее алгоритмам. В режиме “Счет” предусмотрены дополнительные возможности управления параметрами модели и счета (см. табл.2 и табл.8).

## **5.3 Модуль “Бифуркационные диаграммы”**

Работа модуля “Бифуркационные диаграммы” может быть организована в двух режимах: “Счет” и “Продолжение счета”.

### **5.3.1 Счет**

Работа модуля в режиме “Счет” требует предварительного определения параметров исследуемой системы (F2), начальных состояний системы (F3), параметров счета (F4), параметров графических областей изображений (F5), диапазонов изменения проектируемых фазовых координат и варьируемого параметра (F6), а также секущей плоскости (F7). Выход на режим “Счет” осуществляется через главное меню, путем выбора строки “Начало счета” с последующим нажатием клавиши Enter, или нажатием клавиши F8. При выходе на режим “Счет” программа запрашивает имя файла хранения результатов счета. Введите имя файла хранения результатов счета. При этом, если имя введенного вами файла совпадает



Клавиши	Действие
Alt,F1	Вывод короткой справки о назначении функциональных клавиш в графическом режиме
Alt,F2	Сохранение образа экрана в файле в формате РСХ
Alt,F3	Определение координат точки в окне изображений
Alt,F4 <sup>a</sup>	Переключение между режимами отображать/не отображать на экране текущие значения счетчика числа итераций отображения
Alt,F5 <sup>a</sup>	Переключение между режимами отображения информации в первом графическом окне: фазовый портрет или отображение Пуанкаре
Alt,F6 <sup>a</sup>	Переключение между режимами отображения информации во втором графическом окне: фазовый портрет или отображение Пуанкаре
Alt,F10 <sup>b</sup>	Вывод на траектории в файл с именем Trak
Alt,p	Сохранение текущих параметров модели и координат фазовой траектории в виде очередной записи в файле на диске. Номер записи сообщается
Alt,r	Чтение параметров модели и координат фазовой траектории из записи с номером Iz, сделанной по команде <Alt,p>, построение фазовой траектории с извлеченными параметрами
Alt,c	Закрытие файла, открытого по команде <Alt,p> или <Alt,r>
Shift,F1	Установка новых диапазонов изменения проектируемых фазовых координат, сформированных по результатам интегрирования фазовой траектории
	Изменение проектируемых координат <sup>b</sup>
Alt,1(Alt,2)	Уменьшение (увеличение) на единицу номера проектируемой координаты в первом окне по горизонтали
Alt,3(Alt,4)	Уменьшение (увеличение) на единицу номера проектируемой координаты в первом окне по вертикали
Alt,5(Alt,6)	Уменьшение (увеличение) на единицу номера проектируемой координаты во втором окне по горизонтали
Alt,7(Alt,8)	Уменьшение (увеличение) на единицу номера проектируемой координаты во втором окне по вертикали

<sup>a</sup>Только для модуля "Точные отображения".

<sup>b</sup>Только для модуля "Фазовые портреты".

Таблица 8: Дополнительные возможности в режиме "Счет" для модулей "Фазовые портреты" и "Точные отображения".

с именем уже существующего файла, то программа требует разрешения на обновление существующего файла или изменения введенного вами имени файла хранения результатов счета. В режиме “Счет” дисплей переводится в графический режим, на экране высвечиваются графические области(окна) изображений, в которых рисуются проекция (левое окно) и бифуркационная диаграмма (правое окно) отображения Пуанкаре. При этом, если бифуркационная диаграмма содержит циклическую координату, то в процессе построения бифуркационной диаграммы над или под окном диаграммы может появиться красная полоса, которая характеризует вращение проектируемой фазовой координаты. Красная полоса над окном соответствует нарастанию фазовой координаты, под окном – убыванию. На экране дисплея в процессе счета также отображаются текущие значения варьируемого параметра, счетчика точек отображения Пуанкаре (IterU -переходного процесса, неотображаемого в окне построения бифуркационной диаграммы, и Iter -отображаемого в окне построения бифуркационной диаграммы). В процессе построения бифуркационной диаграммы результаты счета (значения варьируемого параметра и фазовая координата бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре) заносятся в файл хранения результатов счета. Процесс построения бифуркационной диаграммы прекращается либо при достижении варьируемым параметром границ интервала изменения, либо пользователем с использованием функциональных клавиш (см. табл.7).

В режиме “Счет” исследователь может изменять параметры счета в соответствии с табл.9.

### **5.3.2 Продолжение счета**

Режим “Продолжение счета” используется для продолжения построения бифуркационной диаграммы после выхода из режима “Счет” или для получения вида бифуркационной диаграммы в измененных окнах графических изображений. Выход на режим “Продолжение счета” осуществляется через главное меню путем выбора строки “Продолжение счета” с последующим нажатием клавиши Enter или нажатием клавиши F9. При выходе на режим “Продолжение счета” программа запрашивает имя файла хранения результатов счета бифуркационной диаграммы, построение которой вы хотите осуществить. Введите имя файла хранения результатов счета.

В режиме “Продолжение счета” дисплей переводится в графический режим, на экране высвечиваются графические области изображений, в которых по данным, сохраненным в указанном пользователем файле, восстанавливается построенная ранее бифуркационная диаграмма отоб-

Клавиши	Действие
→, ←	Принудительное изменение значения варьируемого параметра
↓	Сброс счетчика итераций, принудительное прекращение переходного процесса
Alt,F1	Вывод короткой справки о назначении функциональных клавиш в графическом режиме
Alt,F2	Сохранение графического экрана в файле в формате РСХ
Alt,F3	Определение координат точки в окне изображений
Alt,F5	Переключение между режимами отображения информации в первом графическом окне: фазовый портрет или отображение Пуанкаре
Alt,F6	Переключение между режимами отображения информации во втором графическом окне: фазовый портрет или отображение Пуанкаре
Shift,F1	Перемасштабирование в окне отображения Пуанкаре, проводимое по результатам счета

Таблица 9: Дополнительные возможности для модуля “Бифуркационные диаграммы”, функционирующего в режимах “Счет” или “Продолжение счета”.

ражения Пуанкаре. После восстановления бифуркационной диаграммы программа переходит в режим “Счет”.

## 5.4 Модуль “Периодические движения”

Работа модуля “Периодические движения” может быть организована в двух режимах: “Счет” и “Движение по параметру”.

### 5.4.1 Счет

Выход на режим “Счет” осуществляется через главное меню путем выбора строки “Счет” с последующим нажатием клавиши Enter или нажатием функциональной клавиши F5. При выходе на режим “Счет” на экране появляется меню, содержащее идентификаторы и значения активных параметров, значения фазовых переменных - начальное приближение для поиска неподвижной точки (в процессе счета начальные фазовые координаты изменяются). Запуск программы на поиск координат и вычисление характеристик неподвижной точки осуществляется нажатием клавиш F1 (методом простой итерации), F2 (методом Ньютона). Здесь также предусмотрена возможность получения графического изображения проекции

фазового портрета (клавиша F3).

В процессе счета на экран дисплея выдается промежуточная информация: номер текущей итерации, координаты точки, достигнутая точность нахождения цикла, время интегрирования траектории между последними пересечениями секущей плоскости. Процесс счета может быть прерван пользователем нажатием клавиши Esc.

При успешном завершении процесса поиска координат и характеристик предельного цикла на экран выдаются: значения параметров, координаты точки на цикле (в точке пересечения цикла с секущей плоскостью), период цикла, мультипликаторы цикла, кратность цикла и индекс цикла (только для циклов 2-го рода), характеризующий вращение по угловым фазовым координатам. Эти же данные помещаются в файл результатов `cycle1.r00` – для модуля “Периодические движения-1” и `cycle2.r00` – для модуля “Периодические движения-2”. Если файл с именем `cycle1.r00` (`cycle2.r00`), уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем `cycle1.r01` (`cycle2.r01`), а при наличии файла `cycle1.r01` (`cycle2.r01`) в файл `cycle1.r02` (`cycle2.r02`) и т.д.

В процессе счета вновь найденные координаты неподвижной точки и значения активных параметров сохраняются в виде вектора P1, а координаты неподвижной точки и значения активных параметров найденные на предыдущем шаге (“старые” компоненты вектора P1) сохраняются в виде вектора P2.

После завершения процесса поиска предельного цикла и его характеристик пользователь может продолжить исследование предельных циклов рассматриваемой системы по следующим сценариям:

Сценарий	Клавиши
Перейти на этап изменения текущих значений активных параметров и фазовых координат	F1
Перейти на этап изменения активных параметров и фазовых координат, значения которых берутся из вектора P1	F2
Перейти на этап изменения активных параметров и фазовых координат, значения которых берутся из вектора P2	Shift,F2
Перейти на этап изменения параметров счета	F3
Перейти на этап движения по параметру	F4
Войти в режим работы с архивом результатов	F5
Выйти в главное меню	Esc

Таблица 10: Возможные направления исследований модулей “Периодические движения” в режиме “Счет”.

### 5.4.2 Движение по параметру

Работа модуля в режиме “Движение по параметру” требует предварительного определения метода поиска неподвижной точки и параметров движения. Для определения метода поиска неподвижной точки необходимо в режиме “Счет” найти соответствующим методом (простой итерации или Ньютона) предельный цикл, слежение за которым будет осуществляться в процессе движения по параметру, и далее по клавише F4 перейти на режим определения параметров движения. Движение по параметру осуществляется в плоскости активных параметров, при этом один из параметров условно называется “первым” - по нему в заданном интервале происходит поиск бифуркационного значения параметра, другой - “вторым”. Второй параметр изменяется с постоянным шагом до определенного пользователем конечного значения.

Параметрами режима являются:  $P_{\min}, P_{\max}$ , задающие интервал изменения первого параметра; шаг по первому параметру ( $H_{par}$ ); точность нахождения бифуркационной границы ( $E_{ps}$ ); признак направления поиска ( $I_{moov}=\{1,2\}$ , при  $I_{moov}=1$  значение первого параметра увеличивается на величину  $H_{par}$ , а при  $I_{moov}=2$  - уменьшается); шаг изменения второго параметра ( $H_{par2}$ ); конечное значение второго параметра ( $P_{end2}$ ); признак линейного прогноза при поиске очередной неподвижной точки ( $I_{prog}=\{0,1\}$ ,  $I_{prog}=1$  -осуществлять прогноз,  $I_{prog}=0$  -не осуществлять); признак отслеживания бифуркации ( $I_{bif}=\{0,1\}$ ). При движении по параметру строится граница области существования неподвижной точки отображения, если  $I_{bif}=0$  и бифуркационная кривая, если  $I_{bif}=1$ . Бифуркационная кривая соответствует изменению числа  $j$  мультипликаторов внутри единичного круга.

Соответствие активных параметров “первому” и “второму” устанавливается при настройке на исследуемую систему в локальном меню “Определение плоскости активных параметров исследуемой системы”. Это соответствие может быть изменено при определении параметров движения по параметру с помощью клавиши F2, что отображается в верхней строке локального меню “Параметры движения”.

Запуск программы на счет в режиме движения по параметру осуществляется из локального меню “Параметры движения” нажатием клавиши Esc.

Процесс счета в режиме движения по параметру отображается на экране дисплея и фиксируется в файле результатов `cycle1.r00` (`cycle2.r00`). Наряду с этим параметры цикла (значения параметров, координаты, период, мультипликаторы, число вращения) в окрестности бифуркационной кривой заносятся в архив результатов, а значения активных па-

раметров и числа  $j$ , на концах интервала помещаются в файл MOOV-C1.r00(MOOV-C2.r00). Если файл с именем MOOV-C1.r00(MOOV-C2.r00), уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем MOOV-C1.r01(MOOV-C2.r01), а при наличии файла MOOV-C1.r01(MOOV-C2.r01), в файл MOOV-C1.r02(MOOV-C2.r02) и т.д.

Процесс счета в режиме движения по параметру может быть прерван досрочно пользователем нажатием клавиши Esc.

## 5.5 Модуль “Бифуркационная кривая”

Работа модуля в режиме “Счет” требует определения параметров и начального состояния исследуемой модели в окрестности бифуркационной кривой, поиск которой предполагается осуществить, а также задание параметров счета.

В режиме счет программа ищет координаты точек на кривой, определенной в расширенном фазовом пространстве (фазовое пространство + пространство активных параметров). Точка на бифуркационной кривой соответствует существованию периодического движения в фазовом пространстве, для которого выполняются бифуркационные условия, заданные признаком Ibif. Процесс поиска бифуркационной кривой осуществляется в обоих направлениях от первоначально найденной точки кривой. Процесс поиска очередной точки на бифуркационной кривой в одном направлении прекращается при достижении границ области изменения активных параметров; если очередная точка не может быть найдена, а шаг движения по кривой стал меньше точности определения точек на кривой; если кривая замкнулась. Результаты счета: значения активных параметров на бифуркационной кривой, координаты точки на цикле, мультипликаторы цикла помещаются в файл с именем Curve.r00. Если файл с именем Curve.r00, уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Curve.r01, а при наличии файла Curve.r01, в файл Curve.r02 и т.д.

Процесс нахождения бифуркационной кривой может быть прерван исследователем с помощью клавиш: Esc - после вычисления очередной точки на кривой, F10 - мгновенно. Комбинация клавиш <Alt,p> позволяет сохранить параметры точки на бифуркационной кривой в виде очередной записи в файле с именем Cycle.a

## 5.6 Модуль “Состояния равновесия -1”

В режиме “Счет” модуль находит координаты и характеристические показатели состояния равновесия модели, используя в качестве первого приближения заданные начальные условия. Далее методом половинного

деления определяет интервал значений параметров, на котором происходит бифуркация смены устойчивости состояния равновесия (бифуркация Андронова-Хопфа). В качестве бифуркационного критерия программа использует значение действительной части  $J$ -го характеристического показателя (номер  $J$  устанавливается при инициализации начального состояния, смотри п.2.3). Результаты работы модуля: значения параметров на концах бифуркационного интервала и первой ляпуновской величины помещаются в файл с именем Stable.R00. Если файл с именем Stable.r00, уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Stable.r01, а при наличии файла Stable.r01, в файл Stable.r02, Stable.r03 и т.д.

### 5.7 Модуль “Состояния равновесия -2”

В режиме “Счет” модуль ищет координаты точек на кривой, определенной в расширенном фазовом пространстве (фазовое пространство + пространство активных параметров). Точка на бифуркационной кривой соответствует существованию негрубого состояния равновесия типа седло-узел при  $I_{bif}=1$  и сложный фокус при  $I_{bif}=2$ . Процесс поиска бифуркационной кривой осуществляется аналогично алгоритму “Бифуркационная кривая”. Результаты счета: значения активных параметров на бифуркационной кривой, а также значения первой ляпуновской величины в случае бифуркации Андронова-Хопфа ( $I_{bif}=2$ ) помещаются в файл с именем Equil01.dat. Если файл с именем Equil01.dat уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Equil02.dat, а при наличии файла Equil02.dat, в файл Equil03.dat и т.д.

### 5.8 Модуль “Ляпуновские характеристические показатели”

Работа модуля может быть организована в режимах: “Счет”, “Продолжение счета” и “Движение по параметру”.

Выход на режим “Счет” осуществляется либо через главное меню, путем выбора строки “Счет” с последующим нажатием клавиши Enter, либо нажатием клавиши F5. В режиме “Счет” программа осуществляет вычисление ляпуновских характеристических показателей (ЛХП) на траектории модели либо до выполнения условий

$$\sum_{i=1}^{NR} E_i^2 < \varepsilon, \quad \text{где} \quad E_i = \frac{L_{i,j} - L_{i,j-1}}{L_{i,j}}, \quad i = 1, \dots, NR,$$

( $L_{i,j}$ -значение  $i$ -го ляпуновского показателя после  $j$ -ой перенормировки), либо до достижения конца интервала интегрирования (Timei). Процесс расчета показателей сопровождается выдачей на экран и записью в файл

с именем Lspm.r00 текущих значений ЛХП в момент перенормировки. Если файл с именем Lspm.r00 уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Lspm.r01, а при наличии файла Lspm.r01, в файл Lspm.r02 и т.д.

Процесс вычисления ЛХП может быть прерван исследователем нажатием клавиши Esc. При этом программа запрашивает имя файла, где сохранить информацию, позволяющую впоследствии продолжить начатый процесс вычисления ляпуновских показателей.

Режим “Продолжение счета” позволяет продолжить, прерванный на этапе “Счет”, процесс расчета спектра ляпуновских характеристических показателей. При выборе этого режима программа запрашивает имя файла, где сохранялась информация для продолжения счета. После введения имени архивного файла программа продолжает вычисление, помещая полученную информацию в очередной файл с именем Lspm.r\*.

Режим “Движение по параметру” позволяет рассчитывать спектры ЛХП при вариации одного из параметров модели. При выходе на этот режим программа запрашивает номер варьируемого параметра (Iprv), шаг его изменения (Hpr) и конечное значение (Pend). После определения этих параметров, нажатием клавиши F6, программа переводится в режим расчета ЛХП с вариацией параметра. При этом промежуточные результаты расчета ЛХП для первого значения параметра помещаются файлы с именем Lspm.r00, для второго в Lspm.r01, для третьего Lspm.r02 и т.д. Конечные значения ЛХП и значения варьируемого параметра, которому они соответствуют, помещаются файл именем Moov-Lspm.r00. Если файл с именем Moov-Lspm.r00 уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Moov-Lspm.r01, а при наличии файла Moov-Lspm.r01, в файл Moov-Lspm.r02 и т.д.

## 5.9 Модуль “Спектры”

Модуль может функционировать в следующих режимах: “Режим формирования временной реализации”, “Режим расчета и рисования спектра”, “Режим расчета и рисования автокорреляционной функции”, “Режим рисования спектра или автокорреляционной функции”, “Режим преобразования файла реализации”. Выход на эти режимы осуществляется либо через главное меню, путем выбора соответствующей строки, либо с помощью функциональных клавиш.

### 5.9.1 Формирование временной реализации

В этом режиме на жестком диске создается файл, содержащий временную реализацию, по которой оценивается спектр и автокорреляцион-



ная функция. Работа модуля в этом режиме требует предварительного определения параметров и начального состояния исследуемой модели, а также параметров счета. При выходе на режим формирования временной реализации, программа запрашивает имя файла "Траектория" для сохранения реализации. После формирования имени файла "Траектория" нажмите клавишу Enter. В этом случае программа перейдет к интегрированию исследуемой модели и формированию временной реализации. Процесс формирования продолжается либо до тех пор пока число точек в файле "Траектория" не станет равным Ntr, либо пока процесс не будет прерван исследователем нажатием клавиши Esc. Процесс формирования реализации сопровождается выдачей на экран дисплей каждой 50-ой точки реализации.

*Замечание.* В начало файла "Траектория" записываются значения параметров и начального состояния исследуемой модели, а также значение  $Nv = Ni * Nhi$ .

### **5.9.2 Расчет и рисование спектра(автокорреляционной функции)**

В этом режиме программа рассчитывает спектр(автокорреляцию) по реализации, сохраненной в файле "Траектория" в режиме "Формирование временной реализации". При выходе на этот режим программа запрашивает имя файла "Траектория", после введения которого, переходит в режим вычисления спектра (автокорреляции). Окончание вычисления спектра (автокорреляции) сопровождается запросом имени файла "Спектр" ("Автокорреляция"), куда помещаются результаты расчета спектра (автокорреляции). После ввода имени файла "Спектр" ("Автокорреляция") программа переключается в режим рисования спектра (автокорреляции).

### **5.9.3 Рисование спектра или автокорреляционной функции**

Этот режим позволяет строить графические картины спектра и автокорреляционной функции по данным файлов "Спектр" и "Автокорреляция", которые создаются на этапе расчета спектров и автокорреляции. При выходе на этот режим через главное меню, программа запрашивает имя файла "Спектр" ("Автокорреляция"), который необходимо разрисовать. После введения имени файла на экране дисплея появляется локальное меню "Параметры изображения", где формируются параметры графической области изображения, масштабирования и параметры выводимой информации (см. разд. 4.2.6). Далее предусмотрены следующие возможности:

Сценарий	Клавиши
Разрисовать содержимое файла "Спектр" ("Автокорреляция"). Дисплей переводится в графический режим, на экране высвечиваются графическое окно изображений, в которое выводится содержимое файла согласно параметрам изображений.	F1
Открыть другой файл "Спектр" ("Автокорреляция"). Запрашивается новое имя файла "Спектр" ("Автокорреляция")	F2
Выйти в главное меню	Esc

Таблица 11: Допустимые действия модуля "Спектр" в режиме рисования.

#### 5.9.4 Преобразования файла реализации

Файл "Траектория", созданный в режиме "Формирование временной реализации", имеет специфический формат записи. Данная процедура преобразует файл "Траектория" в файл "Траектория-2", где информация представлена в виде двух колонок: первая содержит время, вторая – значения фазовой переменной. При выходе на этот режим программа запрашивает сначала имя файла "Траектория", затем имя файла "Траектория-2", после чего делает преобразование и возвращается в главное меню.

#### 5.10 Модуль "Сепаратрисные связки-1"

Работа модуля в режиме "Счет" позволяет находить интервал значений параметров, на котором происходит совпадение сепаратрис. Поиск бифуркационного интервала осуществляется методом половинного деления, где в качестве бифуркационного критерия используется обращение в ноль функции расщепления  $\rho = x_1 - x_2 + y_1 - y_2$ , где  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  точки пересечения выходящей и входящей сепаратрис с секущей прямой соответственно. Результаты работы модуля: значения бифуркационного интервала, 2-го активного параметра и седловой величины, помещаются в файл с именем Kontur.R00. Если файл с именем Kontur.r00, уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Kontur.r01, а при наличии файла Kontur.r01, в файл Kontur.r02, Kontur.r03 и т.д.

#### 5.11 Модуль "Сепаратрисные связки-2"

В режиме "Счет" модуль ищет координаты точек бифуркационной кривой на плоскости двух параметров. Процесс поиска бифуркационной кривой осуществляется аналогично алгоритму "Бифуркационная кривая". Здесь в качестве бифуркационного критерия используется обращение в

ноль значения функции расщепления  $\rho$ . Результаты счета: значения активных параметров на бифуркационной кривой и значение седловой величины, помещаются в файл с именем Kontur.R00. Если файл с именем Kontur.r00 уже существует, то программа помещает результаты в файл с именем Kontur.r01, а при наличии файла Kontur.r01, в файл Kontur.r02, Kontur.r03 и т.д.

## **6 Сервисные программы**

### **6.1 Сохранение графического экрана в файле в формате РСХ**

Данная процедура доступна при работе модулей в графическом режиме и позволяет сохранять копии экрана в файле на жестком диске в формате РСХ. Сохранение осуществляется путем нажатия клавиш  $\langle \text{Alt}, \text{F2} \rangle$ , при этом копия экрана сохраняется в файле с именем Fazp-??.рsx - при вызове из модуля “Фазовые портреты”, Mapr-??.рsx - при вызове из модуля “Точечные отображения” и Bifd-??.рsx - при вызове из модуля “Бифуркационные диаграммы”, Spе-??.рsx - при вызове из модуля “Спектры”. Файлы \*.рsx создаются в той же директории, из которой запускалась программная система, при этом знаки ?? есть порядковый номер соответствующего файла с расширением РСХ, начиная с номера 00. Если файл с этим именем уже существует, то программа формирует новое имя, увеличивая порядковый номер на единицу. Процесс сохранения сопровождается коротким звуковым сигналом. При сохранении копии экрана все значения параметров, при которых была получена сохраняемая графическая картина (параметры исследуемой модели, начальные условия фазовых траекторий, параметры счета и графических областей изображений), а также имя файла \*.рsx сохраняются в файлах с расширением dem.

### **6.2 Определение физических координат точки в графическом окне изображений**

Данная процедура доступна при работе модулей в графическом режиме. Она позволяет определять физические координаты точки в графическом окне изображений. Вызов процедуры осуществляется нажатием клавиш  $\langle \text{Alt}, \text{F3} \rangle$ . При этом в первом окне изображений появляется "прицел" (крестик фиолетового цвета), а в левом верхнем углу экрана два числа - физические координаты центра прицела. С помощью клавиш вертикального и горизонтального перемещения курсора можно изменять местоположение прицела в окне изображений, а клавишами

F1, F2, F3, F4, F5 изменять шаг перемещения прицела. При помощи клавиши Esc осуществляется переход во второе и последующие окна изображений. Выход из последнего окна приводит к завершению процедуры определения физических координат. В программных модулях “Фазовые портреты” и “Точечные отображения” предусмотрена возможность построения фазовой траектории с начальными условиями, определенными с помощью прицела. Построения фазовой траектории в прямом времени осуществляется нажатием клавиши S, в обратном времени – N.

### 6.3 Архив результатов

Информация, полученная с помощью программ ДНС, может быть сохранена в архиве результатов, который представляет собой файл прямого доступа на жестком диске. Вызов архива осуществляется из программных модулей по нажатию соответствующих клавиш. При вызове архива результатов первый раз программа запрашивает имя файла архива, после введения которого, открывает файл архива с заданным именем. Если указано имя не существующего файла, то программа требует подтверждения на открытие нового архива и при положительном ответе создает архив с новым именем, а при отрицательном – возвращается на ввод имени архива.

Форма представления информации архива приведена на рис.6. Она содержит поле имени архива (архивного файла), поле идентификатора модели, поля текущей записи и общего числа записей, а также информационные поля записи архива, где отображаются параметры модели, фазовые координаты и характеристики фазовой траектории.

Arxiv:arx		System:Ks3-111	NZ= 6	lz= 1
Cycle: L_{101}			Kod=2001	
Parameters	Phase coordinates	Characteristic		Index
		Re	Im	
G1 = .8000000000	p_1 = .8105897781	Mu( 1)=-.4512 + .5078	mod = .845	0
Eps1= 1.000000000	y_1 =-.5503713102E-01	Mu( 2)=-.4512 - .5078	T = 11.871	0
G2 = .7000000000	p_2 =-3.141592654	Mu( 3)= .2142E-02 + .1478E-02	lkr = 1	1
Eps2= 15.000000000	y_2 = .3981286983	Mu( 4)= .2142E-02 - .1478E-02		0
G3 = .6000000000	p_3 =-.4473630468	Mu( 5)= .8448		1
Eps3= 65.000000000	y_3 = .5229474069			0
d1 = .0000000000				
k1 = .1000000000				
d2 = .0000000000				
k2 = 2.5000000000				

Рис. 6: Архив результатов комплекса ДНС

Создание и обслуживание записей архива осуществляется с помощью сервисных программ комплекса. При создании архива результатов в первую запись (текущей номер записи  $Iz = 0$ ) помещается информация об исследуемой модели: *идентификаторы модели, параметров и фазовых переменных, размерность и число параметров модели*. Далее следуют записи, которые формируются по результатам вычислительного эксперимента. Каждая такая запись имеет свой текущий номер  $Iz$  ( $Iz = \overline{1, Nz}$ , где  $Nz$ -число записей в архиве) и содержит *значения параметров исследуемой модели, координаты точки в фазовом пространстве, код фазовой траектории, ее действительные и целочисленные характеристики, а также текстовую константу длиной 50 символов*. Код фазовой траектории  $k$  представляет собой число, которое используется при визуализации содержимого архива. Он может принимать различные целочисленные значения, однако его первоначальное значения формируется программными модулями комплекса.

Если запись в архив осуществляется из программных модулей “Состояния равновесия”, то  $k=1000$ , текстовая константа содержит запись: “Equilibrium state”, а на экране дисплея при просмотре этой записи наряду с параметрами модели и фазовыми координатами состояния равновесия в поле характеристик отображаются значения характеристических показателей.

Если запись в архив осуществляется из программных модулей “Периодические движения”, то  $k=2000$ , текстовая константа принимает значение: “Cycle”, а на экране дисплея при просмотре этой записи в поле характеристик выводятся значения мультипликаторов цикла, максимальный из модулей мультипликаторов, период и кратность цикла, а также индексы цикла (рис.6).

Если запись в архив осуществляется из программного модуля “Ляпуновские показатели”, то  $k=3000$ , в текстовую константу помещается запись: “Strange attractor”, а на экране дисплея поле характеристик отображаются значения ляпуновских показателей и время, на котором эти показатели вычислялись, а также индексы фазовой траектории.

Записи, сделанные в архив из других программных модулей, имеют нулевой код  $k=0$ , текстовую константу: “Undefined”, а при просмотре этих записей поле характеристик не содержит информации.

Работа с архивом осуществляется при помощи функциональных клавиш в соответствии с табл.12

Для того, чтобы поместить полученную в результате моделирования информацию в архив необходимо установить номер записи  $Iz$  и нажать  $\langle \text{Alt}, W \rangle$ . Для того, чтобы извлечь информацию из архива необходимо установить номер записи  $Iz$  и нажать  $\langle \text{Alt}, R \rangle$ . При этом значения

Клавиши	Действие
↑, ↓	Изменение номера записи Iz
Delete	Удаление записи с номером Iz
Page Down	Просмотр следующей записи архива (Iz=Iz+1)
Page Up	Просмотр предыдущей записи архива (Iz=Iz-1)
Ctrl,Home	Просмотр первой записи архива (Iz=1)
Ctrl,End	Просмотр последней записи архива (Iz=Nz)
Alt,W	Занесение информации в запись с номером Iz
Alt,R	Чтение записи архива с номером Iz
Alt,K	Корректировка записи с номером Iz
Alt,F	Установка фильтра визуализации записей архива
Alt,V	Вывод графического изображения траектории
Alt,P	Вывод информации архива в файл: Arcives.prn
Alt,C	Заккрытие архива
Alt,F1	Вывод короткой справки о назначении клавиш

Таблица 12: Назначение функциональных клавиш при работе с архивом результатов

фазовых координат и параметров модели примут значения из прочитанной записи. Корректировка записи ( $\langle \text{Alt}, \text{K} \rangle$ ) позволяет изменить код и индексы фазовой траектории, а также скорректировать текстовую константу записи. При этом рекомендуется устанавливать такие значения  $k$ , которые обеспечивают правильную визуализацию характеристик аттракторов: для состояний равновесия  $1000 \leq k < 2000$ , для циклов  $2000 \leq k < 3000$ , для инвариантных торов  $3000 \leq k < 4000$ , для странных аттракторов  $4000 \leq k < 5000$ .

Сервисные программы комплекса позволяют просматривать записи только с определенным кодом, для этого необходимо настроить фильтр визуализации записей архива  $F_A$  по следующим правилам. Для просмотра всех записей архива  $F_A = 0$ , для просмотра записей типа "Состояния равновесия" (у которых  $1000 \leq k < 2000$ )  $F_A = 1000$ , для записей типа "Циклы" ( $2000 \leq k < 3000$ )  $F_A = 2000$ , для записей типа "Инвариантные торы" ( $3000 \leq k < 4000$ )  $F_A = 3000$ , для записей типа "Странные аттракторы" ( $4000 \leq k < 5000$ )  $F_A = 4000$ . Для просмотра записей с определенным кодом  $k^*$ , необходимо установить значение фильтра равным значению специфического кода  $F_A = k^*$ , при этом следует учитывать, что значение специфического кода должно удовлетворять условию  $k^* \neq 0, 1000, 2000, 3000, 4000$ .

При нажатии клавиши  $\langle \text{Alt}, \text{V} \rangle$  программа строит изображение фазовой траектории с параметрами из записи с номером Iz, при этом па-

параметры построения и представления траектории определяется в модуле “Фазовые портреты”.

При нажатии клавиши <Alt,P> в файл Arcives.prn выводится следующая информация: имя архива, идентификаторы модели, параметров модели и фазовых координат, а также все записи архива в виде: номер записи, код фазовой траектории, значения параметров модели, значения фазовых координат, действительные и целочисленные характеристики траектории, текстовая константа.

При нажатии клавиши <Alt,C> программа закрывает текущий файл архива результатов и возвращается в исходный модуль. При последующем обращении к архиву результатов будет вновь запрашиваться имя архива.

#### **6.4 Оптимизация файла результатов бифуркационной диаграммы**

При построении бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре действительные значения варьируемого параметра и всех проектируемых координат сохраняются файле результатов. При этом сохраняемая информация весьма избыточна за счет повторяющихся точек отображения. Процесс оптимизации файла результатов позволяет исключить повторяющуюся информацию и уменьшить размеры файла результатов практически без искажения вида бифуркационной диаграммы.

Выход на режим “Оптимизация файла результатов” осуществляется через главное меню модуля “бифуркационные диаграммы”, путем выбора строки “Оптимизация файла результатов” с последующим нажатием клавиши Enter или нажатием клавиши F10. При выходе на режим оптимизации программа запрашивает имена “старого” (файл до оптимизации) и “нового” (файл после оптимизации) файлов хранения результатов счета. Введите имена файлов. При этом, если имя нового файла совпадает с именем уже существующего файла, то программа требует разрешения на обновление существующего файла или изменение введенного вами имени нового файла хранения результатов счета. Процесс оптимизации файла заключается в перезаписи информации из “старого” файла в “новый” с исключением избыточной (повторяющейся) информации.

#### **6.5 Создание программных модулей**

Программный комплекс “Динамика нелинейных систем” работает в среде MS DOS 6.0 и требует 560Кб оперативной памяти и 3Мб свободной памяти на жестком диске.

Для создания программных модулей комплекса ДНС исследователю необходимо оформить подпрограмму, описывающую исследуемую модель, в соответствии со стандартом языка Fortran [18] и далее запустить сервисную программу **SYSP.EXE**. При оформлении подпрограммы должны быть выполнены следующие требования:

- подпрограмма должна иметь имя FUNS и два формальных параметра: первый входной X, второй выходной F, где  $X=(x(1),\dots,x(n))$ – одномерный массив координат фазовой точки,  $F=(f(1),\dots,f(n))$ – одномерный массив значений правых частей динамической системы в точке X при данных значениях параметров P.
- набор параметров  $P=\{p_1,\dots,p_m\}$ , от которых зависит исследуемая модель располагается в общей области памяти с именем PPAR. При оформлении подпрограммы FUNS для параметров можно использовать произвольные имена (см.Пример).
- вычисления в подпрограмме должны производиться с двойной точностью (REAL\*8).

Таким образом, подпрограмма FUNS должна иметь структуру, представленную на рис.7. Пример оформления подпрограмма FUNS для системы Лоренца приведен в рис.8:

```

SUBROUTINE FUNS(X,F)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION X(1),F(1)
COMMON /PPAR/ p1,.....,pm
F(1)=....
.....
F(n)=....
RETURN
END

```

Рис. 7: Структура подпрограммы моделирования динамической системы FUNS

После того, как оформлена подпрограмма FUNS, необходимо запустить сервисную программу SYSP.EXE, которая создает программные модули комплекса ДНС в режиме диалога.

После запуска программы SYSP.EXE, она запрашивает имя файла, содержащего подпрограмму FUNS (имя файла должно иметь расширение for). Далее, если указанный файл оформлен по правилам языка FORTRAN без ошибок, программа последовательно запрашивает: идентификатор исследуемой модели IdenS (символическое имя исследуемой



Модель Лоренца	Подпрограмма Funs
$\begin{aligned}\dot{X} &= -\sigma X + \sigma Y, \\ \dot{Y} &= XZ + rX - Y, \\ \dot{Z} &= XY - bZ\end{aligned}$	<pre> SUBROUTINE FUNS(X,F) IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) DIMENSION X(1),F(1) COMMON /PPAR/ sigma,r,b F(1)=-sigma*x(1)+sigma*x(2) F(2)=-x(1)*x(3)+r*x(1)-x(2) F(3)=x(1)*x(2)-b*x(3) RETURN END </pre>

Рис. 8: Пример оформления подпрограммы FUNS

модели IdenS есть текстовая константа из восьми символов), размерность и число параметров модели, а также идентификаторы параметров IdenP и фазовых переменных IdenX (идентификаторы IdenP и IdenX есть текстовые константы из четырех символов). Идентификаторы параметров IdenP должны указываться в строгом соответствии с порядком следования параметров в операторе COMMON/PPAR/ p1,p2,..., т.е. IdenP(1) должен соответствовать параметру p1, IdenP(2) – параметру p2 и т.д. Аналогичное правило должно соблюдаться при назначении идентификаторов фазовым переменным: IdenX(1) должен соответствовать фазовой переменной x(1), Idenx(2)– переменной x(2) и т.д. После получения ответов на запросы программа SYSP.EXE создает программные модули ДНС в соответствии с табл.1.

Программные модули ДНС могут быть объединены в единый комплекс с помощью программы Start.exe, которая функционирует под управление управляющего файла D.par. Файл D.par с длинной записи 80 байт, создается исследователем в соответствии с табл.13.

Пример составления файла для объединения десяти модулей представлен в табл.14. В этом случае при запуске программы Start.exe на экране дисплея появится меню типа “ветвления” с перечнем восьми, определенных в D.par, задач. Выбор задачи из списка соответствует запуску соответствующего EXE-модуля. В случае объединения взаимосвязь между программами комплекса осуществляется через файл system.par, в котором, при выходе из программных модулей, сохраняются значения параметров и фазовых координат исследуемой модели.

Номер записи	Формат записи	Содержание записи
1	I4	Число объединяемых модулей $L$
2	A80	Символическое имя 1-го объединяемого модуля
3	A80	Символическое имя 2-го объединяемого модуля
...	...	...
$L+1$	A80	Символическое имя $L$ -го объединяемого модуля
$L+2$	A80	Имя EXE-программы 1-го модуля
$L+3$	A80	Имя EXE-программы 2-го модуля
...	...	...
$2L+1$	A80	Имя EXE-программы $L$ -го модуля

Таблица 13: Структура файла D.par

8
1. Проекция фазовых траекторий
2. Отображение Пуанкаре
3. Построение однопараметрических биф. диаграмм
4. Вычисление координат и мультипликаторов циклов
5. Движение по бифуркационной кривой
6. Устойчивость состояний равновесия 1
7. Ляпуновские показатели
8. Спектр
1.exe
2.exe
3.exe
4.exe
5.exe
6.exe
7.exe
8.exe

Таблица 14: Пример файла D.par

## Список литературы

- [1] Пономаренко В.П., Матросов В.В. Автоматизация исследований нелинейной динамики систем синхронизации // Вестник Верхне-Волжского отделения АТН РФ. Высокие технологии в радиоэлектронике. Н.Новгород. 1997. Вып.2(4). С.15.
- [2] Матросов В.В., Пономаренко В.П. Учебно-исследовательский программный комплекс для моделирования нелинейной динамики систем автоматической синхронизации // Автоматизация научных исследований: Межвуз.сб.науч.тр. / Под ред. Прохорова С.А.; КуАИ, Куйбышев, 1989. С.167-172.
- [3] Матросов В.В., Пономаренко В.П. Задачи и алгоритмы моделирования двухконтурных систем синхронизации // Математическое моделирование и методы оптимизации: Межвуз.темат.сб.науч.тр. / Под ред. Сергиевского А.В. -Горьк.гос.ун-т. Горький, 1989. -С.28-45.
- [4] Пономаренко В.П., Матросов В.В. Моделирование динамических процессов в автогенераторных системах с частотным управлением: Учебное пособие - Н.Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1997.
- [5] Пономаренко В.П., Матросов В.В. Нелинейные колебания во взаимодействующих системах фазовой синхронизации: Учебно-методическая разработка. Н.Новгород. Изд-во ННГУ, 1998.
- [6] Пономаренко В.П., Матросов В.В. Некоторые задачи структурного синтеза и анализа нелинейной динамики систем оптимальной обработки сложных сигналов: Учебно-методическая разработка. Н.Новгород. Изд-во ННГУ, 2001.
- [7] Хибник А.И. Периодические решения системы п дифференциальных уравнений. Материалы по математическому обеспечению ЭВМ // Алгоритмы на Фортране, вып.5. -Пушино: НЦБИ АН СССР, 1979.
- [8] Балабаев Н.К., Луневская Л.В. Движение по бифуркационной кривой в N-мерном пространстве. Материалы по математическому обеспечению ЭВМ // Алгоритмы на Фортране, вып.1. -Пушино: НЦБИ АН СССР, 1978.
- [9] Хибник А.И., Шноль Э.Э. Программы для качественного исследования дифференциальных уравнений. Информационные материалы. - Пушино, 1982.

- [10] Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн. И. Теория и приложение бифуркации рождения предельного цикла. - М.: Мир, 1985.
- [11] Белюстина Л.Н., Кивелева К.Г., Фрайман Л.А. Качественно-численный метод в исследовании трехмерных нелинейных СФС // Системы фазовой синхронизации. Под ред. Шахгильдяна В.В., Белюстиной Л.Н. - М: Радио и связь. 1982. С.21-45.
- [12] Паркер Т.С., Чуа Л.О. INSITE-программный инструментарий для анализа нелинейных динамических систем // ТИИЭР. Т.75. N 8. 1987. С.113-123.
- [13] Паркер Т.С., Чуа Л.О. Введение в теорию хаотических систем для инженеров // ТИИЭР. Т.75. N 8. 1987. С.6-40.
- [14] Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
- [15] Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989.
- [16] Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
- [17] Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство. Пер. с англ. / Под ред. Б.В.Чирикова. М.: Мир, 1982.
- [18] Соловьев П.В. Фортран для персонального компьютера. - М.: Арист, 1991.- 223с.