



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 517.929

Хохлова Татьяна Наилевна

# УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ХОПФИЛДА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

М. М. Кипнис

Челябинск – 2012

# Содержание

<b>Введение</b> . . . . .	5
<b>Глава 1 Теоретические основания для диагностирования устойчивости нейронных сетей: конус устойчивости</b> . . . . .	6
1.1 Нейронные сети и дифференциальные уравнения с запаздываниями . . . . .	6
1.2 Овал устойчивости . . . . .	13
1.3 Конус устойчивости для скалярного уравнения с комплексными коэффициентами . . . . .	19
1.4 Конус устойчивости для матричного уравнения . . . . .	23
1.5 Проверка устойчивости уравнения с комплексными коэффициентами посредством системы неравенств . . . . .	29
1.6 Сравнение результатов главы 1 с известными результатами . . . . .	33
<b>Глава 2 Исследование устойчивости стандартных нейронных сетей</b> . . . . .	35
2.1 Алгоритм для определения значений запаздывания, гарантирующих устойчивость дифференциального уравнения с запаздыванием . . . . .	35
2.2 Программный продукт «Анализ устойчивости» . . . . .	41
<b>Глава 3 Численный и теоретический анализ устойчивости нейронных сетей с неограниченным количеством нейронов</b> . . . . .	47
3.1 Постановка задачи и алгоритм диагностирования устойчивости кольцевой сети с неограниченным количеством нейронов . . . . .	47
3.2 Программный продукт «Устойчивость нейронных сетей» . . . . .	52

3.3	Результаты исследования устойчивости кольцевой сети нейронов с неограниченным количеством нейронов . . . . .	57
3.4	Кольцевые сети нейронов с различными коэффициентами демпфирования . . . . .	60
3.5	Разрыв в кольце: нейронная сеть линейной конфигурации . . .	62
3.6	Доказательства теорем главы 3 . . . . .	65
3.7	Сравнение результатов главы 3 с известными результатами . .	68
 <b>Глава 4 Численное и качественное исследование устойчивости сетей кольцевой и линейной конфигураций с ограниченным количеством нейронов . . . . .</b>		
4.1	Алгоритм и программа для построения границ областей устойчивости кольцевых нейронных сетей с ограниченным количеством нейронов . . . . .	71
4.2	Границы областей устойчивости кольцевых сетей с ограниченным количеством нейронов и односторонним запаздыванием . .	79
4.3	Границы областей устойчивости кольцевых сетей с ограниченным количеством нейронов и двусторонним запаздыванием . .	83
4.4	Области устойчивости при разрыве кольцевой сети нейронов .	84
<b>Литература . . . . .</b>		<b>91</b>
<b>Приложение А. Исходный код программы «Анализ устойчивости» . . . . .</b>		<b>94</b>
<b>Приложение Б. Исходный код программы «Устойчивость нейронных сетей» . . . . .</b>		<b>106</b>
<b>Приложение В. Исходный код программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» . . . . .</b>		<b>112</b>

Приложение Г. Общие исходные коды программ . . . . .	123
--	-----

# Введение

**Актуальность работы.** Текст об актуальности [1]. Ссылка [2–5]

**Цель диссертационной работы.** состоит в ...

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

**Научная новизна.** Текст о новизне.

**Практическая значимость.** Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для ...

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:** Текст о результатах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [6–8], 2 статьи в сборниках трудов конференций [9, 10] и 2 комплекса программ зарегистрировано в ОФЭРНиО [11, 12] (сами программы доступны в интернете [13, 14]).

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы,  $n$  глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации  $P$  страниц, из них  $p_1$  страницы текста, включая  $f$  рисунков. Библиография включает  $B$  наименований на  $p_2$  страницах.

# Глава 1

## Теоретические основания для диагностирования устойчивости нейронных сетей: конус устойчивости

### 1.1 Нейронные сети и дифференциальные уравнения с запаздываниями

#### 1.1.1 Модель Хопфилда-Маркуса-Вестервельта

Одна из самых популярных моделей искусственных нейронных сетей предложена Хопфилдом [15] в 1984 г. и с тех пор стала называться моделью Хопфилда. Она описывается дифференциальными уравнениями вида

$$C_j \dot{x}_j(t) + \frac{1}{R_j} x_j(t) + \sum_{k=1}^n T_{jk} g_k(x_k(t)) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1.1)$$

Здесь  $n \geq 2$  есть количество нейронов в сети,  $x_j$  — сигнал,  $C_j$  и  $R_j > 0$  — входные ёмкости и сопротивления соответственно  $j$ -го нейрона. Матрица  $T_{jk}$  размера  $n \times n$  представляет мощность связи между нейронами. Если  $T_{jk} > 0$ , то положительный выходной сигнал  $k$ -го нейрона работает на торможение  $j$ -го нейрона, если  $T_{jk} < 0$ , то на возбуждение, если  $T_{jk} = 0$ , то связь между  $k$ -м и  $j$ -м нейронами отсутствует. Гладкие функции  $g_j$  являются функциями активации.

Сам Хопфилд заметил, что в переключениях нейронов имеются запаздывания. В модель Хопфилда запаздывания впервые ввели Маркус и Вестервельт в 1989 г. [16]. Они рассмотрели модель вида

$$C_j \dot{x}_j(t) + \frac{1}{R_j} x_j(t) + \sum_{k=1}^n T_{jk} g_k(x_k(t - \tau)) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1.2)$$

где  $\tau$  запаздывание.

Во многих работах рассматриваются сети, в которых  $C_j = \text{const}$ ,  $R_j = \text{const}$ , и в таких случаях, изменяя масштаб времени, мы можем считать, что  $C_j = R_j = 1$ . Часто рассматриваются функции  $g_j(x)$  «сигмоидного вида». В нескольких работах (например, [17–19]) изучается система из двух нейронов вида

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) + x_1(t) + T_{12} \text{th}(x_2(t - \tau_2)) &= 0, \\ \dot{x}_2(t) + x_2(t) + T_{21} \text{th}(x_1(t - \tau_1)) &= 0.\end{aligned}\tag{1.3}$$

В работе К. Гопалсами и И. Леунга [17] рассматривается модель (1.3) с  $\tau_1 = \tau_2$ . Имеется даже работа И. Дьери и Хартунга [20] (2003 г.), в которой изучается устойчивость нелинейной модели одного нейрона.

В дальнейшем выяснилось, что для большей адекватности модели естественно ввести различные запаздывания в (1.2) и рассматривать модели вида

$$C_j \dot{x}_j(t) + \frac{1}{R_j} u_j(t) + \sum_{k=1}^n T_{jk} g_k(x_k(t - \tau_{jk})) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \tag{1.4}$$

Известны трудности изучения устойчивости дифференциальных уравнений с двумя запаздываниями даже в скалярном случае, выявленные М. Кипнисом и И. Левицкой [21, 22] в 2003–2007 гг. По этой причине в большинстве исследований часть запаздываний  $\tau_{jk}$ , которые либо в точности равны нулю, либо близки к нулю, переводят из последнего слагаемого в левой части (1.4) во второе слагаемое, а остальные запаздывания отождествляют, и мы от (1.4) переходим к уравнению

$$\dot{x}_j(t) + \sum_{k=1}^n a_{jk} x_k(t) + \sum_{k=1}^n T_{jk} g_k(x_k(t - \tau)) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \tag{1.5}$$

где  $a_{jk}$  коэффициенты, характеризующие мощность мгновенного взаимодействия между нейронами. Наконец, линеаризация уравнения (1.5) вокруг стационарного состояния приводит нас к матричному уравнению

$$\dot{x}(t) + Ax(t) + Bx(t - \tau) = 0, \tag{1.6}$$



где  $n \times n$  матрица  $A$  есть матрица мгновенных взаимодействий, а  $n \times n$  матрица  $B$  — матрица взаимодействий с запаздыванием.

Уравнение (1.6) будет основным в нашем исследовании. Оно подвергалось изучению также в связи с задачами устойчивости систем автоматического управления, например, В. Харитоновым, К. Гу и Дж. Ченом [23] (2003 г.) и Мори с соавторами [24, 25] (1981, 1989 гг.).

Вопрос о глобальной устойчивости стационарных состояний нейронных сетей иногда ставится и при некоторых условиях решается (например, в работах ван дер Дрише [4] (1998 г.), И. Дъери и Ф. Хартунга [20] (2003 и 2007 гг.), [26], Л. Идельса и М. Кипниса [2] (2009 г.)). Но в зависимости от назначения нейронной сети в ней может быть одно или несколько стационарных состояний. Например, если сеть служит в качестве хранилища памяти, то число состояний каждого нейрона больше единицы, а число состояний всей сети, разумеется, растёт экспоненциально в зависимости от числа нейронов.

Поэтому глобальная устойчивость нейронной сети иногда нежелательна. Но локальная устойчивость, по-видимому, является положительным свойством любой нейронной сети. Именно локальная устойчивость стационарных состояний нейронных сетей является предметом диссертационного исследования.

### 1.1.2 Модель нейронных сетей Коэна–Гроссберга

В 1983 году Коэн и Гроссберг [27] предложили модель биологических нейронных сетей, в которых поведение  $j$ -го нейрона в сети  $n$  нейронов ( $1 \leq n$ ) описывается дифференциальными уравнениями

$$\dot{x}_j(t) = c_i(x_j(t)) \left( -d_j(x_j(t)) + \sum_{k=1}^n a_{jk} f_k(x_k(t)) + \sum_{k=1}^n b_{jk} f_k(x_k(t - \tau_{jk})) - I_j \right). \quad (1.7)$$

Здесь  $x_j$  потенциал  $j$ -го нейрона;  $c_j(x_j(t))$  представляет усилитель сигнала  $x_j(t)$ ; положительная функция  $d_j(x_j(t))$  обеспечивает затухание собственного сигнала нейрона в отсутствие взаимодействия с другими нейронами и внешнего воздействия  $I_j$ ; функция  $f_k(x_k)$  это функция активации  $k$ -го нейрона, которая предполагается сигмоидной;  $a_{jk}$  есть сила мгновенного действия нейрона с номером  $k$  на нейрон с номером  $j$ ; наконец, коэффициенты  $b_{jk}$  характеризуют силу действия нейрона с номером  $k$  на нейрон с номером  $j$  с запаздыванием  $\tau_{jk}$ .

Линеаризация уравнения (1.7) вокруг любого решения приводит к основному объекту анализа диссертации — уравнению (1.6).

### 1.1.3 Модель клеточных нейронных сетей Чуа–Янга–Роски

Клеточные нейронные сети (CNN — Cellular Neural Nets) изобрели Л. Чуа и Л. Янг [28] в 1988 г. Искусственные CNN широко применяются в инженерных приложениях [29], [30] (работы соответственно 1998 и 1992 гг.). Книга [31] (2004 г.) полностью посвящена распознаванию образов с помощью CNN. С самого начала развития клеточных нейронных сетей было замечено, что в CNN имеются запаздывания, вызываемые конечной скоростью переключений. Так появилась теория клеточных нейронных сетей с запаздываниями (DCNN — Delay Cellular Neural Nets) [32], [31] (1992, 2004). DCNN описываются дифференциальными уравнениями вида

$$\dot{x}_j(t) = -d_j(x_j(t)) + \sum_{k=1}^n a_{jk} f_k(x_k(t)) + \sum_{k=1}^n b_{jk} f_k(x_k(t - \tau_{jk})) - I_j. \quad (1.8)$$

с интерпретациями функций и коэффициентов, описанными в предыдущем подразделе. В роли функции  $f$  может выступать функция сигмоидного вида, например,  $f(x) = \frac{1}{2}(|x+1| - |x-1|)$ , или  $f(x) = \tanh(x)$  или  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ . Как видим, и в клеточных нейронных сетях с запаздываниями проблема локаль-

ной устойчивости решений сводится к тому же основному уравнению (1.6) нашей диссертации.

#### 1.1.4 Особенности линеаризованных дифференциальных уравнений моделей нейронных сетей

Специфика нейронных сетей в том, что они состояются из однотипных нейронов. Поэтому в отличие от общей теории устойчивости систем управления в исследованиях по нейронным сетям изучаются уравнения (1.6) со специфическими матрицами  $A$ ,  $B$ . Следующие примеры проясняют некоторые особенности описания моделей нейронных сетей.

**Пример 1.1.** Рассмотрим систему из шести нейронов, связи которых указаны на рисунке 1.1. Положим, все связи между различными нейронами

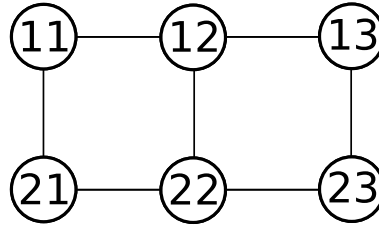


Рис. 1.1. Граф связей в нейронной сети

имеют запаздывание  $\tau$ . Пусть мощность взаимодействия каждого нейрона с левым соседом равна  $a$ , с правым —  $b$ , с верхним —  $c$ , с нижним —  $d$ . Положим, реакция каждого нейрона на свой собственный сигнал мгновенна. Тогда сеть на рисунке 1.1 описывается уравнением (1.6) с вектор-функцией  $x = (x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}, x_{22}, x_{23})^T$  с матрицами

$$A = I, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & b & 0 & d & 0 & 0 \\ a & 0 & b & 0 & d & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & d \\ c & 0 & 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & c & 0 & a & 0 & b \\ 0 & 0 & c & 0 & a & 0 \end{pmatrix}. \quad (1.9)$$

**Пример 1.2.** Рассмотрим вариант интерпретации системы связей на рисунке 1.1) как двуслойной сети. Будем считать, что первый слой состоит из нейронов 11, 12, 13, второй слой из 21, 22, 23. Пусть взаимодействие нейронов внутри слоев происходит без запаздывания, а взаимодействие нейронов из разных слоев происходит с запаздыванием  $\tau$ . Положим, мощности взаимодействия таковы, как они описаны в предыдущем примере.

Усложняя сеть, положим также, что каждый нейрон, кроме мгновенной реакции на собственное состояние, реагирует на собственное состояние ещё и с запаздыванием с некоторой мощностью  $e$  (такие реакции нейронов рассматривались С. Гуо и Л. Хуангом [33], а также С. Кемпбелл с соавторами [34, 35]).

Тогда нейронная сеть описывается уравнением (1.6) с матрицами

$$A = \begin{pmatrix} 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 1 & b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} e & 0 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & e & 0 & 0 & d \\ c & 0 & 0 & e & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & e \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Примеры демонстрируют, что в описании нейронных сетей часто фигурируют симметричные матрицы, а также блочные матрицы относительно несложной структуры. Ещё одна особенность матриц, часто встречающаяся в уравнениях нейронных сетей — ненулевыми элементами заполняются только немногие диагонали над и под главной диагональю, то есть матрицы являются ленточными. Это связано с тем, что во многих (но не всех) сетях нейроны соединяются только с ближайшими в некотором смысле соседями, то есть наблюдается близкодействие. Как покажут следующие главы диссертации, существенной особенностью исследуемых в диссертации задач устойчивости нейронных сетей является зависимость устойчивости только от согласованного спектра двух матриц  $A, B$  в случае их одновременного приведения к треугольной форме.

Дадим обзор содержания остальных разделов главы 1. Достаточные признаки устойчивости матричного уравнения (1.6) даны в [5, 23–25, 36, 37]. В [1] исследуется эта задача для матриц  $2 \times 2$  специального вида. В следующих разделах главы 1 диссертации мы даем метод, позволяющий дать полный геометрический обзор тех значений запаздывания  $\tau$ , которые обеспечивают устойчивость уравнения (1.6). Метод пригоден для уравнений с матрицами  $A, B$ , которые могут быть приведены одной трансформирующей матрицей к треугольному виду. Это в точности класс матриц  $A, B$ , таких что  $AB - BA$  нильпотентна [38]. Этот класс включает все коммутирующие пары матриц  $A, B$ .

Несмотря на указанные ограничения, этот метод даёт возможность изучать устойчивость широких классов нейронных сетей: сетей кольцевой и линейной архитектуры, сетей, описываемых двудольными графами, трёхслойных сетей, так как все вышеуказанные сети описываются уравнениями вида (1.6) с одновременно триангулируемыми матрицами. В примерах 1.1, 1.2 матрицы  $A, B$  коммутируют.

Этот метод основан на конусе устойчивости — некоторой поверхности в  $\mathbb{R}^3$ , одной для класса всех уравнений вида (1.6), в которых матрицы  $A, B$  одновременно приводимы к треугольному виду. Конус устойчивости впервые был введён в работе автора [7] совместно с научным руководителем и В. В. Малыгиной. Идейно конус устойчивости происходит от давней работы З. Рехлицкого [39] (1956), в которой был построен овал устойчивости для некоторого общего уравнения вида (1.6) с  $A = 0$ .

В этой главе конус устойчивости будет введён постепенно. Вначале вводятся овалы устойчивости для скалярного уравнения вида (1.6) с действительным коэффициентом  $A$  и комплексным  $B$  (раздел 1.2), затем конус устойчивости для скалярного уравнения с комплексными коэффициентами (раздел 1.3), который будет работать также и для матричного уравнения (1.6).

В основном разделе 1.4 доказывается теорема о конусе устойчивости для матричного уравнения (1.6), которая будет теоретической основой для алгоритмов диагностирования устойчивости нейронных сетей и их программных реализаций.

Особняком стоит раздел 1.5 о системе неравенств для диагностики устойчивости этого же уравнения. Он не будет использоваться далее в диссертации.

В последнем разделе результаты главы 1 сравниваются с известными результатами.

## 1.2 Овал устойчивости

Рассмотрим уравнение

$$\dot{x}(t) + ax(t) + bx(t - \tau) = 0, \quad \tau > 0. \quad (1.11)$$

Вначале напомним известные результаты об устойчивости уравнения (1.11) при  $a, b \in \mathbb{R}$ . Уравнение (1.11) считаем (асимптотически) устойчивым, если его нулевое решение является (асимптотически) устойчивым. Будем рассматривать уравнение (1.11) с начальными условиями

$$x(t) = \varphi(t), \quad t \in [-\tau, 0], \quad (1.12)$$

где  $\tau > 0$  — запаздывание,  $\varphi(t)$  — начальная функция.

Будем считать, что начальная функция  $\varphi(t)$  кусочно-непрерывна на промежутке  $[-\tau, 0]$ . Решением уравнения (1.11) назовём функцию  $x(t) : [-\tau, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ , удовлетворяющую уравнению (1.11) и условию (1.12). Сформулируем известное утверждение об области устойчивости этого уравнения.

**Предложение 1.1.** *Следующие утверждения верны.*

1. Если  $a \leq -\frac{1}{\tau}$ , то уравнение (1.11) неустойчиво.

2. Если  $a > -\frac{1}{\tau}$ , то уравнение (1.11) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда

$$-a < b < S(a), \quad (1.13)$$

где кривая  $b = S(a)$  задаётся следующим образом:

$$\begin{cases} a(\omega) = -\frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega \tau}, \\ b(\omega) = \frac{\omega}{\sin \omega \tau}, \\ 0 < \omega < \frac{\pi}{\tau}. \end{cases} \quad (1.14)$$

3. Если  $a > -\frac{1}{\tau}$  и, кроме того, либо  $b = -a$ , либо  $b = S(a)$ , то уравнение (1.11) устойчиво (не асимптотически).
4. Если  $a > -\frac{1}{\tau}$  и, кроме того, либо  $b < -a$ , либо  $b > S(a)$ , то уравнение (1.11) неустойчиво.

На рисунке 1.2 изображена область устойчивости уравнения (1.11) в плоскости параметров уравнения  $(b, a)$ .

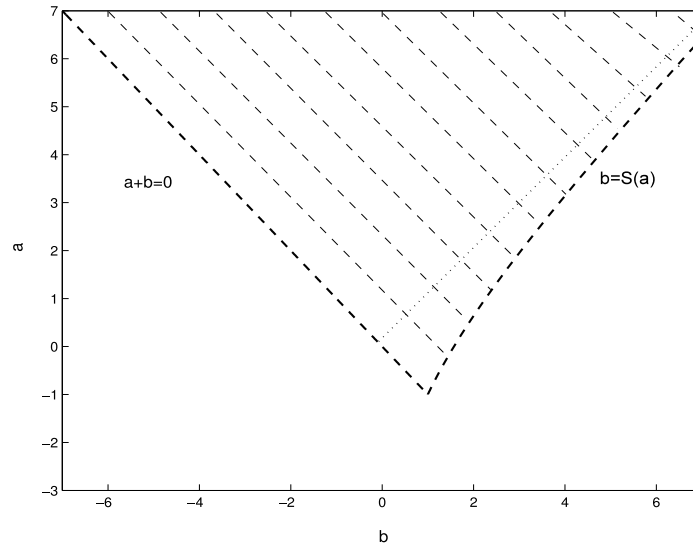


Рис. 1.2. Область устойчивости уравнения (1.11), указанная в предложении (1.1)

Заметим, что кривая  $b = S(a)$  имеет наклонную асимптоту  $a = b$  (при  $\omega \rightarrow \frac{\pi}{\tau}$  данная кривая неограниченно приближается к прямой  $a = b$ , отмеченной на графике пунктиром).

Теперь рассмотрим уравнение (1.11) при  $a \in \mathbb{R}$ ,  $b \in \mathbb{C}$ . Дадим определение овала устойчивости.

**Определение 1.1.** *Овалом устойчивости для уравнения (1.11) с данным  $a \in \mathbb{R}$ ,  $a > -\frac{1}{\tau}$  называется кривая  $b = b(\omega)$  на комплексной плоскости переменного  $b$ , заданная уравнением*

$$\begin{cases} \operatorname{Re} b(\omega) = -a \cos \omega\tau + \omega \sin \omega\tau, \\ \operatorname{Im} b(\omega) = -a \sin \omega\tau - \omega \cos \omega\tau, \\ -\omega_1 \leq \omega \leq \omega_1, \end{cases} \quad (1.15)$$

где  $\omega_1$  — наименьший положительный корень уравнения  $a \sin \omega\tau + \omega \cos \omega\tau = 0$ .

Следующая теорема упомянута в некоторой другой форме в виде недоказанного и небрежно сформулированного утверждения в одной из статей Мори с соавторами (см. [24], Appendix B).

**Теорема 1.1.** *Пусть в уравнении (1.11)  $a \in \mathbb{R}$ . Тогда верны следующие утверждения.*

1. *Если  $a \leq -\frac{1}{\tau}$ , то уравнение (1.11) неустойчиво при любых комплексных  $b$ .*
2. *Если  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $(\operatorname{Re} b, \operatorname{Im} b)$  находится внутри овала устойчивости для данного  $a$  (см. определение 1.1), то уравнение (1.11) асимптотически устойчиво.*



3. Если  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $(\operatorname{Re} b, \operatorname{Im} b)$  находится на границе овала устойчивости для данного  $a$ , то уравнение (1.11) устойчиво (не асимптотически).
4. Если  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $(\operatorname{Re} b, \operatorname{Im} b)$  находится вне овала устойчивости для данного  $a$ , то уравнение (1.11) неустойчиво.

**Доказательство.** Для определения границ области устойчивости уравнения (1.11) на комплексной плоскости параметра  $b$  будем использовать метод  $D$ -разбиений [40], при этом полагаем, что  $a \in \mathbb{R}$  фиксированная величина. Характеристический квазимногочлен уравнения (1.11) имеет вид

$$F(\lambda) = \lambda + a + b e^{-\lambda\tau}. \quad (1.16)$$

Согласно методу  $D$ -разбиений, если точка  $(\operatorname{Re} b, \operatorname{Im} b)$  принадлежит границе области устойчивости, то  $\exists \omega \quad F(i\omega) = 0, \quad \omega \in (-\infty, \infty)$ . Получим

$$F(i\omega) = i\omega + a + b e^{-i\omega\tau} = i\omega + a + (\operatorname{Re} b + i \operatorname{Im} b) (\cos \omega\tau - i \sin \omega\tau) = 0. \quad (1.17)$$

Выделим действительную и мнимую части:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} F(i\omega) = a + \operatorname{Re} b \cdot \cos \omega\tau + \operatorname{Im} b \cdot \sin \omega\tau = 0, \\ \operatorname{Im} F(i\omega) = \omega - \operatorname{Re} b \cdot \sin \omega\tau + \operatorname{Im} b \cdot \cos \omega\tau = 0. \end{cases} \quad (1.18)$$

Отсюда получаем кривую  $D$ -разбиения на комплексной плоскости переменного  $b$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} b &= -a \cos \omega\tau + \omega \sin \omega\tau, \\ \operatorname{Im} b &= -a \sin \omega\tau - \omega \cos \omega\tau. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Кривая (1.19) при  $\omega \in (-\infty, \infty)$  разбивает комплексную плоскость параметра  $b$  на бесконечное множество областей, соответствующих либо устойчивости, либо неустойчивости уравнения (1.11). Проверить каждую область на устойчивость можно, проверив какую-либо внутреннюю точку (тестовую точку) этой области.

На рисунке 1.3 изображены кривые  $D$ -разбиения комплексной плоскости параметра  $b$  при  $\omega \in (-2.7\pi, 2.7\pi)$ ,  $a = 1, \tau = 1$ .

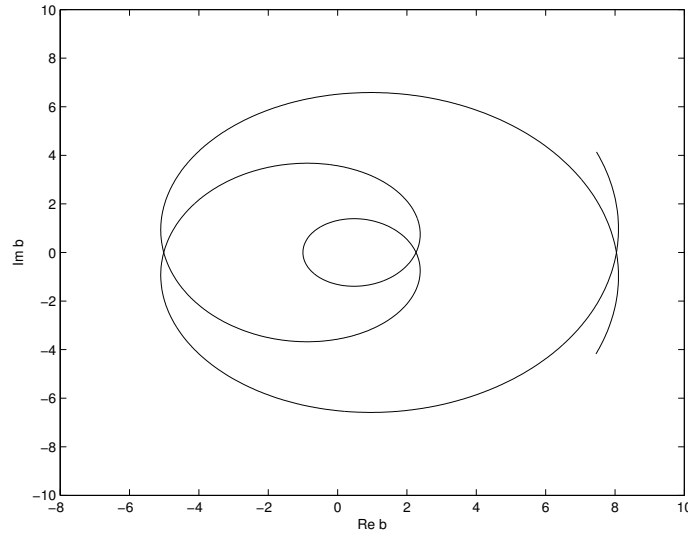


Рис. 1.3. Кривые  $D$ -разбиения комплексной плоскости параметра  $b$

В качестве тестовых будем рассматривать точки на прямой  $\text{Im } b = 0$ , так как эта прямая проходит через все области.

Перейдём к перечислению случаев различного расположения числа  $a$  относительно  $-\frac{1}{\tau}$ .

1) Пусть  $a \leq -\frac{1}{\tau}$ . Тогда в каждой области  $D$ -разбиения плоскости комплексного переменного  $b$  возьмём в качестве тестовой именно точку с  $\text{Im } b = 0$ . По части 1 предложения 1.1 в этой точке имеется неустойчивость. Поэтому и во всей рассматриваемой области имеется неустойчивость. Пункт 1 теоремы 1.1 доказан.

2) Пусть  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $(\text{Re } b, \text{Im } b)$  находится внутри овала устойчивости для данного  $a$ . Рассмотрим в качестве тестовых точки внутри овала устойчивости, такие что  $b \in \mathbb{R}$ ,  $b \in (b(0), b(\omega_1))$ . Овал изображен на рисунке 1.4, а точки  $b \in \mathbb{R}$ ,  $b \in (b(0), b(\omega_1))$  отмечены пунктиром.

На овале устойчивости  $b(0) = -a$ ,  $b(\omega_1) = \frac{\omega_1}{\sin \omega_1 \tau} = S(a)$ , поэтому неравенство  $b(0) < b < b(\omega_1)$  равносильно неравенству  $-a < b < S(a)$ , что в си-

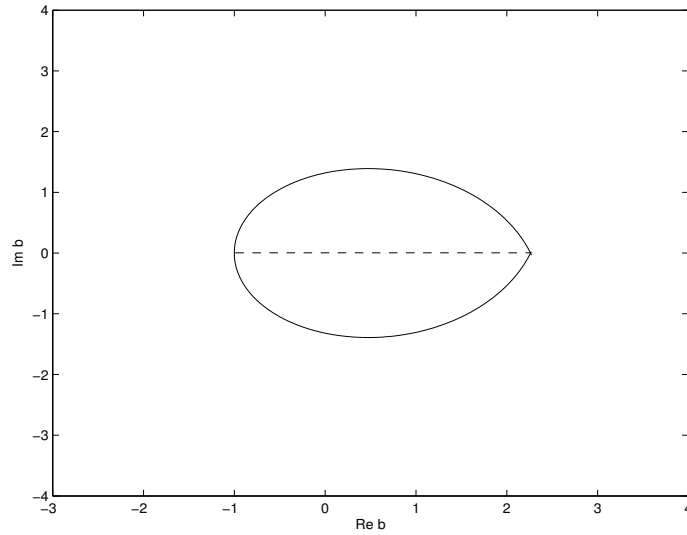


Рис. 1.4. Овал устойчивости уравнения (1.11)

лу части 2 предложения 1.1 влечёт асимптотическую устойчивость уравнения (1.11). Пункт 2 теоремы 1.1 доказан.

3) Пусть  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $b$  лежит на границе овала устойчивости для данного  $a$ . Нам следует доказать, что корень  $\lambda$  характеристического уравнения, такой что  $\operatorname{Re} \lambda = 0$ , является некратным. Действительно, из (1.17) получим

$$\frac{dF}{d\lambda} = 1 - b\tau e^{-i\omega\tau}. \quad (1.20)$$

Обращение в нуль функции  $F(\lambda)$  и её производной в силу (1.17), (2.15) даёт  $\lambda + a + \frac{1}{\tau} = 0$ , что влечёт  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,  $\lambda < 0$ . Пункт 3 теоремы доказан.

4) Пусть  $a > -\frac{1}{\tau}$  и точка  $(\operatorname{Re} b, \operatorname{Im} b)$  находится вне овала устойчивости. Тогда точка  $b$  находится в одной из областей  $D$ -разбиения, и для проверки устойчивости достаточно рассмотреть действительные значения  $b$ . Для таких  $b$  либо  $b < b(0) = -a$ , либо  $b > b(\omega_1) = S(a)$ . В обоих случаях по части 4 предложения 1.1 уравнение (1.11) неустойчиво. Теорема доказана. ■

Примечание 1.1. Положение овала устойчивости на плоскости параметра  $b$  зависит от значения  $a$ . На рисунке 1.5 на комплексной плоскости параметра  $b$  изображены овалы устойчивости при различных значениях параметра  $a$ .

При  $a \leq -\frac{1}{\tau}$  овал устойчивости вообще не существует. При  $0 > a > -\frac{1}{\tau}$  овал полностью расположен в полуплоскости  $\operatorname{Re} b > 0$ . При  $a = 0$  крайняя левая точка овала лежит в начале координат, а остальные точки овала находятся в полуплоскости  $\operatorname{Re} b > 0$ . При  $a > 0$  граница овала находится в обеих полуплоскостях.

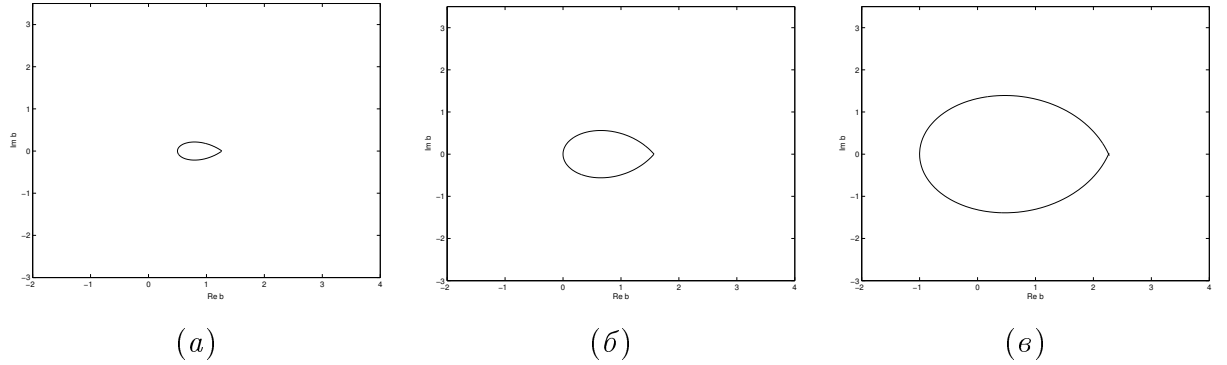


Рис. 1.5. Овал устойчивости: (а)  $-\frac{1}{\tau} < a < 0$ , (б)  $a = 0$ , (в)  $a > 0$

### 1.3 Конус устойчивости для скалярного уравнения с комплексными коэффициентами

Поначалу рассмотрим уравнение (1.11) с действительными коэффициентами  $a$  и комплексными  $b$ . Для исследования его устойчивости, а в дальнейшем также и для матричного уравнения (1.6) определим в  $\mathbb{R}^3$  некоторую поверхность, которую назовём конусом устойчивости.

**Определение 1.2.** Конусом устойчивости для уравнений (1.11), (1.6) назовём множество точек  $M = (u_1, u_2, u_3) \in \mathbb{R}^3$ , таких, что

$$\begin{cases} u_1 = -h \cos \omega + \omega \sin \omega, \\ u_2 = h \sin \omega + \omega \cos \omega, \\ u_3 = h, \end{cases} \quad (1.21)$$

где действительные параметры  $h, \omega$  подчинены ограничениям

$$\begin{cases} h \geq -\frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega}, \\ -\pi < \omega < \pi. \end{cases} \quad (1.22)$$

Примечание 1.2. Единственный конус устойчивости (1.21), (1.22) строится для класса всех уравнений вида (1.11) и (1.6).

Ключевым свойством конуса устойчивости является следующее. Сечение конуса устойчивости плоскостью  $u_3 = a$  таково, что:

1) При  $a < -1$  сечение является пустым множеством, при  $a = -1$  единственная точка сечения  $(1, 0, -1)$  — вершина конуса.

2) При  $a > -1$  сечение является овалом устойчивости для данного  $a$  для уравнения (1.11) при  $\tau = 1$ .

Чтобы записать теорему 1.1 в терминах конуса устойчивости, сделаем в уравнении (1.11) замену  $t = \theta \tau$ . Получим

$$\frac{dx(\theta\tau)}{d(\theta\tau)} + a x(\theta\tau) + b x((\theta - 1)\tau) = 0. \quad (1.23)$$

Обозначим  $x(\theta\tau) = y(\theta)$ . Отметим, что

$$\frac{dy(\theta)}{d\theta} = \frac{dx(\theta\tau)}{d\theta} = \frac{dx(\theta\tau)}{d(\theta\tau)} \tau, \quad (1.24)$$

откуда

$$\frac{\dot{y}_\theta(\theta)}{\tau} + a y(\theta) + b y(\theta - 1) = 0. \quad (1.25)$$

Переобозначив  $\theta = t$ , получим

$$\dot{y}(t) + a\tau y(t) + b\tau y(t - 1) = 0. \quad (1.26)$$

При условии  $\tau > 0$  уравнение (1.26) устойчиво тогда и только тогда, когда устойчиво уравнение (1.11). Прямое применение теоремы 1.1 к уравнению (1.26) доказывает следующую теорему.

**Теорема 1.2.** Пусть в уравнении (1.11)  $a \in \mathbb{R}$ ,  $b \in \mathbb{C}$ ,  $\tau > 0$ . Построим точку  $M = (\operatorname{Re} b\tau, \operatorname{Im} b\tau, a\tau) \in \mathbb{R}^3$ . Тогда имеют место следующие утверждения.

1. Уравнение (1.11) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда точка  $M$  находится внутри конуса устойчивости.
2. Если точка  $M$  находится на поверхности конуса устойчивости (но не в его вершине), то уравнение (1.11) устойчиво (не асимптотически).
3. Если точка  $M$  находится вне конуса устойчивости или на его вершине, то уравнение (1.11) неустойчиво.

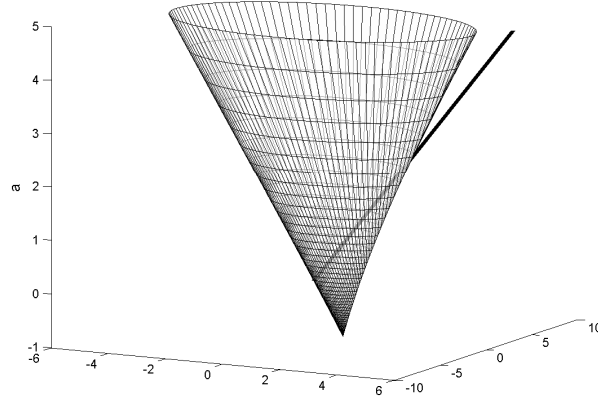
**Пример 1.3.** Пусть дано уравнение (1.11), для которого

$$a = 0.8, b = 1 + 0.5i. \quad (1.27)$$

Требуется определить, при каких значениях  $\tau$  это уравнение устойчиво, а при каких неустойчиво.

Для асимптотической устойчивости согласно теореме 1.2 необходимо и достаточно, чтобы точка  $(\operatorname{Re} b\tau, \operatorname{Im} b\tau, a\tau)$  находилась внутри конуса устойчивости. Построим конус устойчивости и точки  $(\operatorname{Re} b\tau, \operatorname{Im} b\tau, a\tau)$  при  $\tau \in [0, +\infty)$ , образующие некоторую прямую. Конус устойчивости и данная прямая изображены на рисунке (1.6).

Прямая пересекает конус устойчивости при  $\tau = 0$ , что соответствует точке  $(0, 0, 0)$ , и при  $\tau = \tau_0 \approx 2.4$ . При  $\tau \in (0, \tau_0)$  точка  $(\operatorname{Re} b\tau, \operatorname{Im} b\tau, a\tau)$  лежит внутри конуса устойчивости, поэтому уравнение (1.11), (1.27) асимптотически устойчиво. При  $\tau > \tau_0$  точка находится вне конуса устойчивости, поэтому уравнение неустойчиво. При  $\tau = \tau_0$  уравнение устойчиво (не асимптотически).

Рис. 1.6. Конус устойчивости и точки  $(\operatorname{Re} b\tau, \operatorname{Im} b\tau, a\tau)$  при  $\tau \in [0, 5]$ 

Перейдём к уравнению (1.11) с двумя комплексными коэффициентами. Рассмотрим уравнение

$$\dot{x}(t) + \lambda x(t) + \mu x(t - \tau) = 0, \quad (1.28)$$

где  $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$ .

Для исследования устойчивости уравнения (1.28) сделаем замену

$$x(t) = y(t) \exp(-it \operatorname{Im} \lambda). \quad (1.29)$$

В результате замены (1.29) и сокращений получим уравнение

$$\dot{y}(t) + (\operatorname{Re} \lambda) y(t) + \mu \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda) y(t - \tau) = 0. \quad (1.30)$$

Так как  $|\exp(-it \operatorname{Im} \lambda)| = 1$ , уравнение (1.28) (асимптотически) устойчиво тогда и только тогда, когда уравнение (1.30) (асимптотически) устойчиво.

Ввиду того, что коэффициент при  $y(t)$  в (1.30) является действительным, задачу устойчивости уравнения (1.30) мы можем решить с помощью теоремы (1.2). Таким образом, мы доказали следующую теорему.

**Теорема 1.3.** Пусть в уравнении (1.28)  $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$ . Построим точку  $M = (u_1, u_2, u_3)$  так, что

$$\begin{aligned} u_1 &= \tau \operatorname{Re}(\mu \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda)), \\ u_2 &= \tau \operatorname{Im}(\mu \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda)), \\ u_3 &= \tau \operatorname{Re} \lambda. \end{aligned} \tag{1.31}$$

Тогда имеют место следующие утверждения.

1. Уравнение (1.28) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда точка  $M$  находится внутри конуса устойчивости.
2. Если точка  $M$  находится на поверхности конуса устойчивости (но не в его вершине), то уравнение (1.28) устойчиво (не асимптотически).
3. Если точка  $M$  находится вне конуса устойчивости или на его вершине, то уравнение (1.28) неустойчиво.

## 1.4 Конус устойчивости для матричного уравнения

Возвратимся к рассмотрению матричного уравнения (1.6). Для удобства ссылок выпишем его заново:

$$\dot{x}(t) + Ax(t) + Bx(t - \tau) = 0. \tag{1.32}$$

Следующая теорема является основой для алгоритмов диагностирования устойчивости стационарных состояний нейронных сетей. Теорема пригодна только для случая, когда матрицы  $A, B$  могут быть приведены одним преобразованием к треугольному виду. Но, как показывает практика изучения устойчивости нейронных сетей, этого достаточно для анализа многих типовых сетей.



**Теорема 1.4.** Пусть  $A, B, S \in \mathbb{R}^{m \times m}$  и  $S^{-1}AS = A_T$  и  $S^{-1}BS = B_T$ , где  $A_T$  и  $B_T$  — нижние треугольные матрицы с элементами соответственно  $\lambda_{js}, \mu_{js}$  ( $1 \leq j, s \leq m$ ). Построим систему точек  $M_j = (u_{1j}, u_{2j}, u_{3j})$ , ( $1 \leq j \leq m$ ), так, что

$$\begin{aligned} u_{1j} &= \tau \operatorname{Re}(\mu_{jj} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jj})), \\ u_{2j} &= \tau \operatorname{Im}(\mu_{jj} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jj})), \\ u_{3j} &= \tau \operatorname{Re} \lambda_{jj}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Уравнение (1.32) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда все точки  $M_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) находятся внутри конуса устойчивости (см. определение 1.2). Если хотя бы одна точка  $M_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) лежит вне конуса устойчивости, то уравнение (1.32) неустойчиво.

**Доказательство.** Введём новую функцию  $y = (y_1, \dots, y_m)^T$  равенством  $x = Cy$  и умножим уравнение (1.32) на  $C^{-1}$  слева. Получим

$$\dot{y}(t) + A_T y(t) + B_T y(t - \tau) = 0. \quad (1.34)$$

Уравнение (1.32) (асимптотически) устойчиво тогда и только тогда, когда (асимптотически) устойчиво (1.34). Рассмотрим диагональную систему

$$\dot{y}_j(t) + \lambda_{jj} y_j(t) + \mu_{jj} y_j(t - \tau) = 0, \quad 1 \leq j \leq m. \quad (1.35)$$

Системы (1.34) и (1.35) имеют одинаковые характеристические уравнения

$$\prod_{j=1}^m (\lambda + \lambda_{jj} + \mu_{jj} \exp(-\lambda\tau)) = 0. \quad (1.36)$$

Поэтому асимптотическая устойчивость системы (1.34) равносильна асимптотической устойчивости системы (1.35). Неустойчивость (1.34) также равносильна неустойчивости (1.35). Применение теоремы 1.3 к каждому из  $n$  скалярных уравнений системы (1.35) завершает доказательство теоремы. ■

Примечание 1.3. Формулы (1.21) в определении конуса устойчивости можно записать компактнее:

$$u_1 + i u_2 = (i \omega - h) \exp(-i \omega), \quad u_3 = h. \quad (1.37)$$

Взамен (1.33) точки  $M_j$  можно определить равенствами

$$u_{1j} + i u_{2j} = \tau \mu_{jj} \exp(i \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}), \quad u_{3j} = \tau \operatorname{Re} \lambda_{jj}. \quad (1.38)$$

**Пример 1.4.** С помощью геометрического метода теоремы 1.4 найдём значения запаздывания  $\tau$ , обеспечивающие асимптотическую устойчивость уравнения (1.32) с матрицами

$$A = \begin{pmatrix} 0.72 & -0.96 \\ 4.08 & -0.60 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0.08 & -0.08 \\ 0.34 & -0.03 \end{pmatrix}. \quad (1.39)$$

Поскольку  $A = 12B - 0.24I$ , матрицы  $A, B$  коммутируют и, следовательно, могут быть совместно приведены к диагональной форме [38]. Собственные числа матриц  $A, B$  суть соответственно

$$\lambda_{11,22} = 0.0600 \pm 1.8658i, \quad \mu_{11,22} = 0.0250 \pm 0.1555i. \quad (1.40)$$

Вследствие симметрии изучим расположение конической винтовой линии (1.33) относительно конуса устойчивости (1.21), (1.22) только при  $j = 1$ . Кривая имеет вид (см. рис. 1.7)

$$\begin{aligned} u_{11} &= 0.1575\tau \cos(1.4114 + 1.8658\tau), \\ u_{21} &= 0.1575\tau \sin(1.4114 + 1.8658\tau), \\ u_{31} &= 0.06\tau. \end{aligned} \quad (1.41)$$

Точки кривой находятся внутри конуса устойчивости при следующих значениях запаздывания:  $\tau \in (0, 0.2729) \cup (1.6893, 3.3978) \cup (5.3439, 6.5218) \cup (8.9955, 9.6457) \cup (12.6502, 12.7675)$ , поэтому уравнение (1.32) с матрицами (1.39) асимптотически устойчиво только при таких значениях запаздывания.

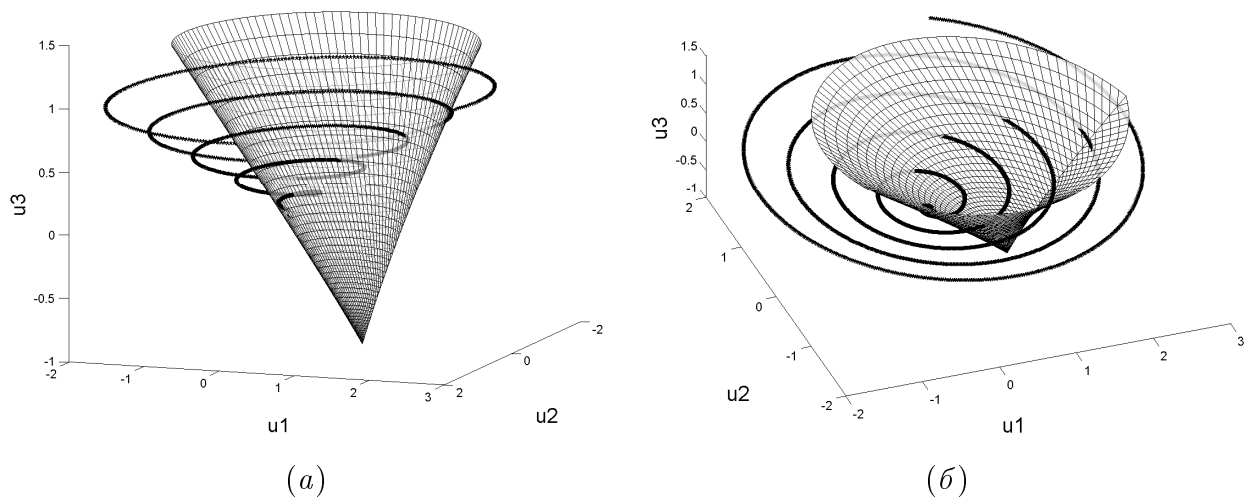


Рис. 1.7. Конус устойчивости и кривая (1.41) в разных проекциях

**Пример 1.5.** Положим в (1.32)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -3 & 2 \\ -3 & 1 & -2 & 3 \\ -1 & 0.5 & 4 & -2 \\ -3 & 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}, B = 0.8I + 0.2A + 2A^2. \quad (1.42)$$

Требуется определить, при каких значениях  $\tau$  это уравнение устойчиво, а при каких неустойчиво.

Очевидно, матрицы  $A, B$  коммутируют. Собственные числа матриц  $A$  и  $B$  имеют вид

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 3.562, & \mu_1 &= 26.888, \\ \lambda_{2,3} &= 2.368 \pm 1.514i, & \mu_{2,3} &= 7.902 \pm 14.640i, \\ \lambda_4 &= -1.298, & \mu_4 &= 3.907. \end{aligned}$$

При этом

$$a_1 = \operatorname{Re} \lambda_1 = 3.562, \quad a_2 = \operatorname{Re} \lambda_2 = 2.368,$$

$$a_3 = \operatorname{Re} \lambda_3 = 2.368, \quad a_4 = \operatorname{Re} \lambda_4 = -1.298.$$

$$b_1 = \mu_1 \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_1) = 26.888,$$

$$b_2 = \mu_2 \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_2) = 16.637 \exp(i(1.076 + 1.514\tau)),$$

$$b_3 = \mu_3 \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_3) = 16.637 \exp(i(-1.076 - 1.514\tau)),$$

$$b_4 = \mu_4 \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_4) = 3.9073.$$

Построим кривые  $(\operatorname{Re} b_j \tau, \operatorname{Im} b_j \tau, a_j \tau), j = \overline{1, 4}$  и конус устойчивости. Они изображены на рисунке 1.8.

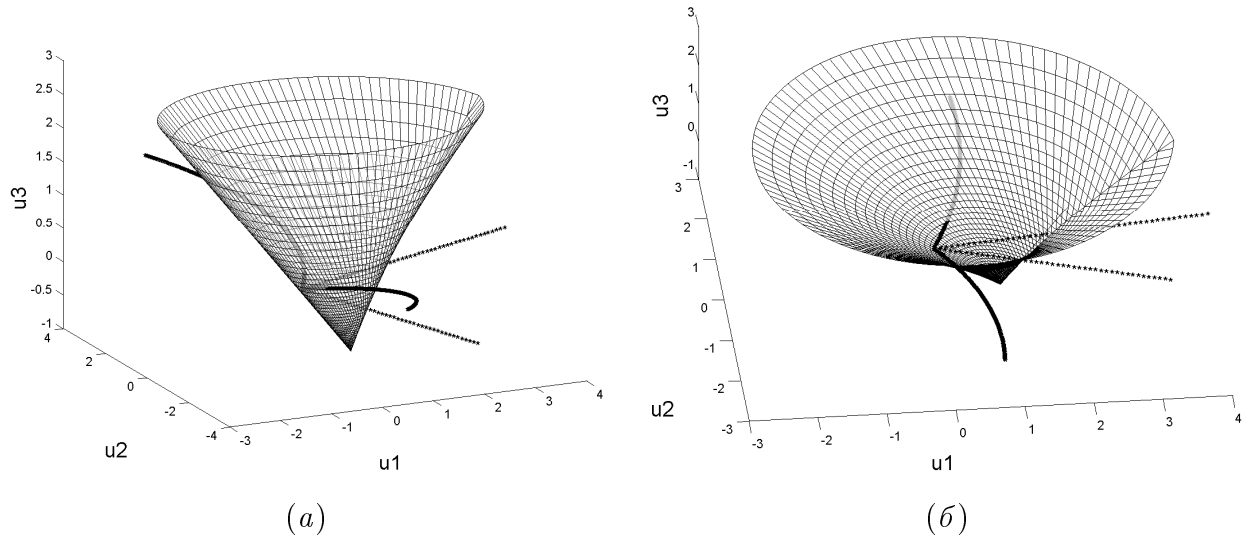


Рис. 1.8. Конус устойчивости и кривая  $(\operatorname{Re} b_j \tau, \operatorname{Im} b_j \tau, a_j \tau)$  в разных проекциях

Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно, чтобы все точки кривой  $(\operatorname{Re} b_j \tau, \operatorname{Im} b_j \tau, a_j \tau)$  находились внутри конуса устойчивости. Две системы точек, соответствующие комплексным собственным значениям матрицы  $A$ , с изменением  $\tau$  образуют винтовые линии, пересекающие конус устойчивости при  $\tau_{2,3} \approx 0.033$ . Две другие системы точек, соответствующие

действительным собственным значениям матрицы  $A$ , находятся внутри конуса при  $\tau \in (0, \tau_1)$ , где  $\tau_1 \approx 0.063$ , и при  $\tau \in (0, \tau_4)$ , где  $\tau_4 \approx 0.321$ .

Итак, уравнение (1.32) с матрицами (1.42) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда  $\tau \in (0, \tau_0)$ , где  $\tau_0 = \min(\tau_1, \tau_{2,3}, \tau_4) = \tau_{2,3} \approx 0.033$ . При  $\tau > \tau_0$  уравнение (1.32) неустойчиво.

Таким образом, метод конусов устойчивости, описанный в данном разделе, позволяет исследовать устойчивость систем (1.32) с совместно триангулируемыми матрицами (см. также [9], [10]) и наглядно интерпретировать результаты. В частности, в [6] автором рассмотрен случай равенства нулю одной из координат в (1.33). Нахождение интервалов значений запаздываний, обеспечивающих устойчивость рассматриваемого уравнения и указанных в примерах (1.4), (1.5), требует конструирования специального алгоритма, основанного на методе конусов устойчивости, и будет подробно описано в главе 2 настоящей диссертации.

Обсудим следующую задачу: при каких условиях уравнение (1.32) с  $n \times n$  матрицами  $A, B$  является устойчивым независимо от запаздывания  $\tau$ ?

Рассмотрим  $n+2$  конуса в  $\mathbb{R}^3$ . Первый  $K^1$  — конус устойчивости (см. определение 1.2). Вторым  $K^2$  — конус  $u_1^2 + u_2^2 = u_3^2$ ,  $u_3 \geq 0$ . Конус  $K^1$  содержит  $K^2$  и оба конуса неограниченно сближаются при  $u_3 \rightarrow +\infty$ . Если  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} \neq 0$ ,  $\mu_{jj} \neq 0$ , то другие  $n$  конусов зададим формулами

$$K_j : (\operatorname{Re} \lambda_{jj})^2(u_{11}^2 + u_{22}^2) = |\mu_{jj}|^2 u_3^2, \quad 1 \leq j \leq n, \quad (1.43)$$

где  $\lambda_{jj}, \mu_{jj}$  диагональные элементы матриц  $A, B$  соответственно.

На конусах  $K_j$  лежат конические спирали 1.38, указанные в теореме 1.4 (спираль вырождается в прямую, если  $\operatorname{Im} \lambda_{jj} = 0$ ). Если  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} < 0$ , то  $u_3 < 0$  в 1.38, и тогда точки  $M_j$  выходят из  $K^1$  при неограниченном увеличении  $\tau$  (при  $\mu_{jj} \neq 0$ ), что влечёт неустойчивость уравнения (1.32). Следовательно,

асимптотическая устойчивость (1.32), независимая от запаздывания  $\tau$ , имеет место тогда и только тогда, когда для любого  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ )  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > 0$  и конус  $K^j$  лежит внутри  $K^2$ , то есть

$$|\mu_{jj}| < \operatorname{Re} \lambda_{jj}. \quad (1.44)$$

Итак, мы доказали следующую теорему.

**Теорема 1.5.** Пусть  $A, B, S \in \mathbb{R}^{m \times m}$  и  $S^{-1}AS = A_T$  и  $S^{-1}BS = B_T$ , где  $A_T$  и  $B_T$  — нижние треугольные матрицы с элементами соответственно  $\lambda_{js}, \mu_{js}$  ( $1 \leq j, s \leq m$ ). Для того, чтобы уравнение (1.32) было асимптотически устойчивым при любом запаздывании  $\tau \geq 0$ , необходимо и достаточно выполнение условия (1.44).

Автору неизвестно, есть ли условие (1.44) в литературе, кроме статьи автора совместно с научным руководителем и В. В. Малыгиной [7]. Другое, не столь удобное условие устойчивости, независимой от запаздывания (delay-independent) дано в [41].

Наш подход даёт геометрическое понимание условия (1.44), гарантирующего устойчивость, независимую от запаздывания.

## 1.5 Проверка устойчивости уравнения с комплексными коэффициентами посредством системы неравенств

Для уравнения (1.28) сформулируем и докажем теорему, позволяющую делать вывод об устойчивости данного уравнения с помощью системы неравенств, не прибегая при этом к геометрическим процедурам. Другое решение этой задачи имеется в работе А. И. Кирьянена и К. В. Галуновой [36]. В дальнейшем в диссертации мы не будем использовать результаты этого раздела.

Мы внесли эту тему в диссертацию, чтобы продемонстрировать «от противного» преимущества метода конуса устойчивости.

Рассмотрим уравнение

$$\dot{x}(t) + \rho_1 \exp(i\alpha_1) x(t) + \rho_2 \exp(i\alpha_2) x(t - \tau) = 0, \quad (1.45)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$ .

В соответствии с (1.30) оно эквивалентно следующему уравнению:

$$\dot{y}(t) + \rho_1 \cos \alpha_1 y(t) + \rho_2 \exp(i(\alpha_2 + \rho_1 \tau \sin \alpha_1)) y(t - \tau) = 0. \quad (1.46)$$

Поскольку в (1.46) коэффициент при  $y(t)$  действительный, можно применить теорему 1.2 с заменой уравнения (1.11) на (1.45) и при

$$a = \rho_1 \cos \alpha_1, \quad b = \rho_2 \exp(i(\alpha_2 + \rho_1 \tau \sin \alpha_1)). \quad (1.47)$$

Будем использовать функцию  $\arg z$  комплексного переменного  $z$ , считая, что  $0 \leq \arg z < 2\pi$ .

**Теорема 1.6.** Пусть дано уравнение (1.45). Тогда следующие утверждения верны.

1. Если  $\rho_2 < \rho_1 \cos \alpha_1$ , то уравнение (1.45) асимптотически устойчиво.
2. Если  $-\min(1/\tau, \rho_2) < \rho_1 \cos \alpha_1 < \rho_2$ , то уравнение (1.45) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда одновременно выполняются условия:

$$\rho_2 < \sqrt{\omega_1^2 + \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}, \quad (1.48)$$

где  $\omega_1$  есть наименьший положительный корень уравнения  $a \sin \omega \tau + \omega \cos \omega \tau = 0$ , и

$$\arg(\exp(i(\alpha_2 + \rho_1 \tau \sin \alpha_1))) \in (0, \beta) \cup (2\pi - \beta, 2\pi), \quad (1.49)$$

где

$$\beta = \arg(\exp(-i\tau\sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1})) + \gamma, \quad (1.50)$$

$$\gamma = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}}{\rho_1 \cos \alpha_1}, & \cos \alpha_1 < 0, \\ \pi - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}}{\rho_1 \cos \alpha_1}, & \cos \alpha_1 > 0. \end{cases}$$

3. Если  $\rho_1 \cos \alpha_1 < -\min(1/\tau, \rho_2)$ , то уравнение (1.45) неустойчиво.

**Доказательство.** Уравнение (1.45) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда асимптотически устойчиво уравнение (1.46). Поэтому будем исследовать устойчивость уравнения (1.46).

1) При  $\rho_2 < \rho_1 \cos \alpha_1$  по теореме 1.1 и примечанию 1.1 овал устойчивости существует и начало координат лежит внутри овала устойчивости. При этом окружность радиуса  $\rho_2$  полностью лежит внутри овала устойчивости, что обеспечивает асимптотическую устойчивость уравнения (1.46).

2) Пусть  $-\min(1/\tau, \rho_2) < \rho_1 \cos \alpha_1 < \rho_2$ . Рассмотрим 2 случая.

*Случай 2.1.*  $-\min(1/\tau, \rho_2) < \rho_1 \cos \alpha_1 < 0$ . При этом овал устойчивости существует и полностью лежит в правой полуплоскости. Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно выполнение двух условий. Одно из них обеспечивает пересечение окружности радиуса  $\rho_2$  с овалом устойчивости, что равносильно условию (1.48). Второе условие связано с тем, что аргумент точки  $\exp(i(\alpha_2 + \rho_2 \tau \sin \alpha_1))$  должен находиться между аргументом точек  $M, N$  пересечения окружности радиуса  $\rho_2$  с овалом устойчивости. Рассмотрим точку  $M$ , лежащую в верхней полуплоскости. Отметим, что часть овала устойчивости (1.15), лежащая в верхней полуплоскости, соответствует



отрицательным значениям параметра  $\omega$ .

$$\begin{aligned}\arg M &= \arg(-\rho_1 \cos \alpha_1 \exp(i\omega\tau) - i\omega \exp(i\omega\tau)) = \\ &= \arg(\exp(i\omega\tau)) + \arg(-\rho_1 \cos \alpha_1 - i\omega) = \\ &= \arg(\exp(i\omega\tau)) + \operatorname{arctg} \frac{|\omega|}{\rho_1 \cos \alpha_1}.\end{aligned}\quad (1.51)$$

По определению овала устойчивости (см. определение 1.1) имеем

$$\omega = \pm \sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}.$$

Поэтому

$$\arg M = \arg \left( \exp \left( -i\tau \sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1} \right) \right) + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}}{\rho_1 \cos \alpha_1}.\quad (1.52)$$

Из (1.52) следует, что второе условие равносильно (1.49).

*Случай 2.2.*  $0 < \rho_1 \cos \alpha_1 < \rho_2$ . Так как  $\cos \alpha_1 > 0$ , то овал устойчивости существует и начало координат лежит внутри овала устойчивости. Те же требования приводят к условиям (1.48), (1.49). Отметим, что при  $\cos \alpha_1 > 0$  получим

$$\arg(-\rho_1 \cos \alpha_1 - i\omega) = \pi - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\rho_2^2 - \rho_1^2 \cos^2 \alpha_1}}{\rho_1 \cos \alpha_1}.\quad (1.53)$$

3) Пусть  $\rho_1 \cos \alpha_1 < -\min(1/\tau, \rho_2)$ . Возможны два случая.

*Случай 3.1.*  $\rho_1 \cos \alpha_1 < -\frac{1}{\tau}$ . Тогда по теореме 1.1 уравнение неустойчиво.

*Случай 3.2.*  $-\frac{1}{\tau} < \rho_1 \cos \alpha_1 < -\rho_2$ . При этом овал устойчивости существует и начало координат лежит внутри овала устойчивости. Так как  $\rho_2 < -\rho_1 \cos \alpha_1$ , то окружность радиуса  $\rho_2$  не пересекает овал устойчивости, поэтому уравнение неустойчиво. Теорема доказана.  $\blacksquare$

## 1.6 Сравнение результатов главы 1 с известными результатами

Идейным источником метода конусов устойчивости явились работы Рехлицкого, в частности, статья [39] (1956), в которой впервые появился овал устойчивости для некоторого линейного уравнения с запаздыванием в банаховом пространстве.

Результаты главы 1 диссертации сильнее результатов статьи Б. Калона и Д. Шмидта [42] (2000), в которой рассматривалась задача об устойчивости узкого класса уравнений вида

$$\dot{x}(t) = \alpha Ax(t) + (1 - \alpha)Ax(t - \tau), \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (1.54)$$

с  $n \times n$  матрицей  $A$ .

Наши результаты также перекрывают результаты Х. Мацунаги [43], который в 2007 г. исследовал устойчивость частного случая нашего основного уравнения (1.6) с некоторыми специальными  $2 \times 2$  матрицами  $A, B$ , коммутируемыми, и поэтому приводимыми к треугольному виду.

Устойчивость круговых нейронных сетей с четырьмя [34] (1999) и с произвольным количеством нейронов [35] (2004) изучены в работах С. Кэмпбелл с соавторами. Такие сети описываются дифференциальными уравнениями с двумя запаздываниями вида

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + \alpha x_j(t - \tau_0) + \beta (x_{j-1}(t - \tau) + x_{j+1}(t - \tau)) = 0 \quad (j \bmod n). \quad (1.55)$$

Наши методы непригодны для работы с системами с двумя и более запаздываниями. В дальнейшем в диссертации мы рассмотрим круговую сеть нейронов, которая, с одной стороны, проще, чем (1.55), поскольку в ней отсутствует запаздывание в реакции нейрона на собственное состояние ( $\alpha = 0$ ), с другой стороны, сложнее, поскольку в ней отсутствует принудительная симметрич-

ность мощности взаимодействия нейронов с левым и правым соседями в круге.

## Глава 2

# Исследование устойчивости стандартных нейронных сетей

### 2.1 Алгоритм для определения значений запаздывания, гарантирующих устойчивость дифференциального уравнения с запаздыванием

В этом разделе мы дадим алгоритм для определения всех значений  $\tau$ , которые гарантируют устойчивость дифференциального уравнения

$$\dot{x}(t) + Ax(t) + Bx(t - \tau) = 0 \quad (2.1)$$

с  $n \times n$  матрицами  $A, B$ , допускающими одновременную триангуляцию.

Пусть матрицы  $A$  и  $B$  приведены к треугольному виду  $A_T, B_T$  одним преобразованием. Пусть  $\lambda_{jj}, \mu_{jj}$ ,  $1 \leq j \leq n$  собственные числа матриц  $A$  и  $B$  в том порядке, в котором они расположены на диагоналях матриц  $A_T, B_T$ . Для каждого  $j$ ,  $1 \leq j \leq n$  составим множество  $T_j$  по следующему **алгоритму**.

Если для некоторого  $j$  выполнено  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > |\mu_{jj}|$ , то  $T_j = (0, +\infty)$ . В противном случае находим числа

$$\tau_j^m = \frac{\arg(\pm iQ - \operatorname{Re} \lambda_{jj}) - \arg \mu_{jj} + 2\pi m}{\operatorname{Im} \lambda_{jj} \pm Q}, \quad m \in \mathbb{Z},$$
$$Q = \sqrt{|\mu_{jj}|^2 - (\operatorname{Re} \lambda_{jj})^2}. \quad (2.2)$$

Из чисел  $\tau_j^m$  выбираем такие, для которых

$$0 < \tau_j^m \leq \pi/Q \quad \text{и} \quad \operatorname{Re} \lambda_{jj} \geq -\frac{Q}{\operatorname{tg}(Q \tau_j^m)}, \quad (2.3)$$

и сортируем по возрастанию, исключая повторения. Полученные числа обозначим  $\tau_{1j}, \tau_{2j}, \dots, \tau_{sj}$ .

Составим множество  $T_j$  следующим образом. Пусть

$$T_j = (0, \tau_{1j}) \cup (\tau_{2j}, \tau_{3j}) \cup \dots \quad (2.4)$$

в следующих случаях:

1)  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > 0$  и выполнено хотя бы одно условие

$$\text{а) } \arg \mu_{jj} \in (-\pi/2, \pi/2) \quad \text{или} \quad \text{б) } \frac{\operatorname{Re} \lambda_{jj}}{|\operatorname{Re} \mu_{jj}|} > 1. \quad (2.5)$$

$$2) \operatorname{Re} \lambda_{jj} < 0, \quad \left| \frac{\operatorname{Re} \lambda_{jj}}{\operatorname{Re} \mu_{jj}} \right| < 1 \quad \text{и} \quad \arg \mu_{jj} \in (-\pi/2, \pi/2). \quad (2.6)$$

В остальных случаях

$$T_j = (\tau_{1j}, \tau_{2j}) \cup (\tau_{3j}, \tau_{4j}) \cup \dots \quad (2.7)$$

Последним интервалом в  $T_j$  может быть  $(\tau_{s-1j}, \tau_{sj})$  или  $(\tau_{sj}, +\infty)$ . Если для некоторого  $j$  множество  $(\tau_{1j}, \tau_{2j}, \dots, \tau_{sj})$  пусто и выполнено (2.5) или (2.6), то  $T_j = (0, +\infty)$ .

Докажем теорему.

**Теорема 2.1.** Пусть множества  $T_j, 1 \leq j \leq n$  составлены согласно описанному алгоритму. Тогда уравнение (2.1) асимптотически устойчиво если и только если  $\tau \in \bigcap_j T_j$ .

**Доказательство.** Построим для каждого  $j$  точку  $M_j = (u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}) \in \mathbb{R}^3$ , так что (см. (1.33))

$$\begin{aligned} u_{1j} &= \tau \operatorname{Re}(\mu_{jj} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jj})), \\ u_{2j} &= \tau \operatorname{Im}(\mu_{jj} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jj})), \\ u_{3j} &= \tau \operatorname{Re} \lambda_{jj}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Построим также конус устойчивости для уравнения (2.1), а именно множество точек  $M = (u_1, u_2, u_3) \in \mathbb{R}^3$ , таких, что

$$\begin{cases} u_1 = -h \cos \omega + \omega \sin \omega, \\ u_2 = h \sin \omega + \omega \cos \omega, \\ u_3 = h, \end{cases} \quad (2.9)$$

где действительные параметры  $h, \omega$  подчинены ограничениям

$$\begin{cases} h \geq -\frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega}, \\ -\pi < \omega < \pi. \end{cases} \quad (2.10)$$

Согласно Теореме 1.4 уравнение (2.1) асимптотически устойчиво если и только если все точки  $M_j$  лежат внутри конуса устойчивости (2.9), (2.10).

С изменением  $\tau$  от 0 до  $+\infty$  точки (2.8) образуют винтовые линии (прямые в случае  $\operatorname{Im} \lambda_{jj} = 0$ ). Для каждого  $j$  найдем значения  $\tau$ , соответствующие точкам пересечения этих линий с овалом устойчивости  $(u_1, u_2)$  на уровне  $u_3 = h$ . Эти значения  $\tau$  являются корнями уравнения

$$\tau \mu_{jj} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}) = (i\omega - h) \exp(-i\omega), \quad h = \tau \operatorname{Re} \lambda_{jj}, \quad (2.11)$$

с параметрами  $h, \omega$ , удовлетворяющими условию (2.10).

Система (2.11) равносильна системе

$$\begin{cases} \tau |\mu_{jj}| = \sqrt{\omega^2 + h^2}, \\ \arg \mu_{jj} + \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj} = -\omega + \arg(i\omega - h) + 2\pi m, \quad m \in \mathbb{Z}, \\ h = \tau \operatorname{Re} \lambda_{jj}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Из первого и третьего уравнения системы (2.12) найдем  $\omega$ :

$$\omega = \pm \tau \sqrt{|\mu_{jj}|^2 - (\operatorname{Re} \lambda_{jj})^2} = \pm \tau Q. \quad (2.13)$$

Подставим  $\omega$  во второе уравнение системы (2.12), а также воспользуемся свойством  $\arg(\tau z) = \arg(z)$  для любого  $\tau > 0$ . Получим уравнение

$$\tau(\operatorname{Im} \lambda_{jj} \pm Q) = \arg(\pm iQ - \operatorname{Re} \lambda_{jj}) - \arg \mu_{jj} + 2\pi m, \quad (2.14)$$

корнями которого являются числа  $\tau_j^m$ , указанные в формулировке теоремы.

Отметим, что  $\omega \in [-\pi, \pi]$ , поэтому требуется выполнение условия

$$\pm \tau \sqrt{|\mu_{jj}|^2 - (\operatorname{Re} \lambda_{jj})^2} = \pm \tau Q \in [-\pi, \pi],$$

что означает  $0 < \tau \leq \pi/Q$ .

Кроме того, поскольку  $h \geq -\frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega}$ , то

$$\operatorname{Re} \lambda_{jj} \geq -\frac{Q}{\operatorname{tg}(Q \tau_j^m)}.$$

Таким образом, для каждого  $j$  требуется найти такие  $\tau_j^m$ , которые удовлетворяют условиям (2.3).

Для правильного определения интервалов устойчивости данной винтовой линии (прямой) необходимо отсортировать числа  $\tau_j^m$  по возрастанию, т.е. получить систему чисел  $\tau_{1j}, \tau_{2j}, \dots, \tau_{lj}$ , и определить, является ли интервал  $(0, \tau_{1j})$  интервалом устойчивости или интервалом неустойчивости. Интервалы устойчивости и неустойчивости чередуются, поэтому в зависимости от характера первого интервала составим множество  $T_j$ , которое будет иметь вид  $T_j = (0, \tau_{1j}) \cup (\tau_{2j}, \tau_{3j}) \cup \dots$  или  $T_j = (\tau_{1j}, \tau_{2j}) \cup (\tau_{3j}, \tau_{4j}) \cup \dots$ . Это множество тех значений запаздывания, при которых точки винтовой линии  $(u_{1j}(\tau), u_{2j}(\tau), u_{3j}(\tau))$  находятся внутри конуса устойчивости.

Для ответа на вопрос, является ли интервал  $(0, \tau_{1j})$  интервалом устойчивости, определим, лежат ли точки винтовой линии  $(u_{1j}(\tau), u_{2j}(\tau), u_{3j}(\tau))$  при  $\tau \rightarrow 0+$  внутри овала устойчивости. Заметим, что при  $u_3 = 0$  овал устойчивости лежит в правой полуплоскости, а его левая вершина лежит в начале координат.

Сначала рассмотрим случай  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > 0$ . При этом  $u_3 > 0$  и винтовая линия лежит выше плоскости  $u_3 = 0$ . Чтобы точки винтовой линии при  $\tau \rightarrow 0+$  лежали внутри конуса устойчивости, достаточно, чтобы вектор производной  $\frac{du_2}{du_1}$  при  $\tau \rightarrow 0+$  лежал в полуплоскости  $u_1 > 0$  или независимо от этого модуль коэффициента наклона образующих винтовой линии в сечении  $u_2 = 0$  был больше единицы.

В первом случае для нахождения угла наклона касательной к винтовой линии в плоскости  $(u_1, u_2)$  в точке  $\tau = 0$  вычислим производную параметрически заданной кривой  $u_{2j}(u_{1j})$  в данной точке.

$$\begin{aligned} \left. \frac{du_{2j}}{du_{1j}} \right|_{\tau=0} &= \left. \frac{(u_{2j})'_\tau}{(u_{1j})'_\tau} \right|_{\tau=0} = \\ &= \left. \frac{|\mu_{jj}|(\sin(\arg \mu_{jj} + \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}) + \tau \cos(\arg \mu_{jj} + \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}) \operatorname{Im} \lambda_{jj})}{|\mu_{jj}|(\cos(\arg \mu_{jj} - \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}) + \tau \sin(\arg \mu_{jj} + \tau \operatorname{Im} \lambda_{jj}) \operatorname{Im} \lambda_{jj})} \right|_{\tau=0} = \\ &= \operatorname{tg} \arg \mu_{jj}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Если угол наклона касательной к винтовой линии в точке  $\tau = 0$  лежит в интервале  $(-\pi/2, \pi/2)$ , то точки винтовой линии лежат внутри овала устойчивости при  $\tau \rightarrow 0+$ , тогда интервал  $(0, \tau_{1j})$  является интервалом устойчивости.

Отметим, что  $\arg z \in [-\pi, \pi]$ . Если  $\arg \mu_{jj} \in [-\pi/2, \pi/2]$ , то интервал  $(0, \tau_{1j})$  является интервалом устойчивости. Таким образом, получено условие (2.5) а).

Во втором случае найдем коэффициент наклона образующих винтовой линии в сечении  $u_2 = 0$ . Он равен

$$\left. \frac{du_{3j}}{du_{1j}} \right|_{\tau=0} = \left. \frac{(u_{3j})'_\tau}{(u_{1j})'_\tau} \right|_{\tau=0} = \frac{\operatorname{Re} \lambda_{jj}}{\operatorname{Re} \mu_{jj}}. \quad (2.16)$$

Таким образом, если  $\frac{\operatorname{Re} \lambda_{jj}}{|\operatorname{Re} \mu_{jj}|} > 1$ , то точки винтовой линии при  $\tau \rightarrow 0+$  лежат внутри конуса устойчивости, а значит, интервал  $(0, \tau_{1j})$  является интервалом устойчивости. Получено условие (2.5) б).



Теперь рассмотрим случай  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} < 0$ . При этом  $u_3 < 0$  и винтовая линия лежит ниже плоскости  $u_3 = 0$ . В этом случае для нахождения точек винтовой линии внутри конуса устойчивости при  $\tau \rightarrow 0+$  требуется, чтобы вектор производной  $\frac{du_2}{du_1}$  при  $\tau \rightarrow 0+$  лежал в полуплоскости  $u_1 > 0$  и модуль коэффициента наклона образующих винтовой линии в сечении  $u_2 = 0$  был меньше единицы. Таким образом, должны одновременно выполняться условия  $\arg \mu_{jj} \in [-\pi/2, \pi/2]$  и  $\left| \frac{\operatorname{Re} \lambda_{jj}}{\operatorname{Re} \mu_{jj}} \right| < 1$ , т.е. должно выполняться условие (2.6).

Во всех остальных случаях точки винтовой линии лежат вне конуса устойчивости при  $\tau \rightarrow 0+$ , поэтому множество  $T_j$  составляется по формуле (2.7).

Если для некоторого  $j$  выполнено  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > |\mu_{jj}|$ , то винтовая линия лежит внутри конуса устойчивости при всех значениях запаздывания, поэтому для нее  $T_j = (0, +\infty)$ .

Таким образом, для каждого  $j$  составлено множество  $T_j$  тех значений запаздывания, при которых точки винтовой линии  $(u_{1j}(\tau), u_{2j}(\tau), u_{3j}(\tau))$  находятся внутри конуса устойчивости.

Для устойчивости уравнения (2.1) требуется, чтобы все точки  $M_j = (u_{1j}, u_{2j}, u_{3j})$ ,  $1 \leq j \leq n$  находились внутри конуса устойчивости при данном  $\tau$ . Значит, уравнение (2.1) асимптотически устойчиво тогда и только тогда, когда  $\tau \in \bigcap_j T_j$ . Утверждение теоремы доказано. ■

Заметим, что если равенство  $\operatorname{Re} \lambda_{jj} > |\mu_{jj}|$  верно для всех  $j$ , то уравнение (2.1) асимптотически устойчиво при всех  $\tau \geq 0$  (Теорема 1.5).

## 2.2 Программный продукт «Анализ устойчивости»

### 2.2.1 Функциональное назначение и область применения программы

Программный продукт «Анализ устойчивости» предназначен для исследования устойчивости нулевого решения дифференциального уравнения (2.1) с одновременно триангулируемыми матрицами  $A, B$ . Исследование устойчивости нейронных сетей многих стандартных конфигураций сводится именно к этому уравнению.

Алгоритм нахождения значений запаздывания, гарантирующих устойчивость уравнения (2.1) при данных матрицах  $A$  и  $B$ , указан в разделе 2.1 диссертации. В ходе реализации этого алгоритма строится система точек (их количество равно порядку матриц) и исследуется взаимное расположение нуса устойчивости и данных точек.

На основе теоретических результатов, полученных автором, в программном пакете MATLAB 7.11.0 (R2010b) была разработана программа для анализа устойчивости уравнения (2.1). Исходный код программы доступен в приложении А.

В зависимости от собственных чисел матриц  $A$  и  $B$  в порядке, определенном их совместным приведением к треугольному виду, программа «Анализ устойчивости» позволяет получить множество значений запаздывания, обеспечивающих устойчивость уравнения (2.1), и таким образом определить, является ли уравнение с данным запаздыванием  $\tau$  устойчивым. Пользователь имеет возможность сделать вывод об устойчивости уравнения при конкретном значении запаздывания, а при возможности управления запаздыванием оценить интервалы значений запаздывания, обеспечивающих устойчивость данного уравнения. Теоретически алгоритм позволяет определить устойчи-

вость уравнения (2.1) для матриц любого порядка, но программа реализована для систем размерности не выше пятой.

Программа может применяться при разработке и исследовании моделей, описываемых скалярными и матричными дифференциальными уравнениями с запаздыванием (2.1), в частности, моделей нейронных сетей.

### 2.2.2 Использование

Все входные параметры задаются на панели «Входные данные». Размерность легко задаётся при помощи ползунка. Пользователю предлагается два способа задания матриц  $A$  и  $B$ : с помощью базовой матрицы (по умолчанию выбирается именно этот способ) или с помощью задания собственных чисел матриц.

При выборе первого способа (рис. 2.1) пользователю необходимо заполнить элементы базовой матрицы  $D$ , порядок которой автоматически определяется выбранной размерностью. Далее необходимо ввести коэффициенты в разложении матриц  $A$  и  $B$  по степеням матрицы  $D$ .

Такой подход позволяет обеспечить совместную триангулируемость матриц и правильное соответствие между собственными числами матриц. Ввести элементы матрицы  $D$  и коэффициенты можно двумя способами: вручную или при помощи кнопки «Заполнить», которая генерирует случайные числа в каждой ячейке. Для очистки матрицы и коэффициентов существует кнопка «Очистить».

При выборе второго способа (рис. 2.2) пользователю требуется ввести собственные значения матриц  $A$  и  $B$  в порядке, определенном одновременным приведением матриц  $A, B$  к треугольному виду (количество собственных чисел определяется размерностью). Для этого можно также воспользоваться

**Анализ устойчивости уравнения**  
 $x'(t) + Ax(t) + Bx(t-\tau) = 0$

Входные данные  
**Размерность = 5**

**Выберите способ задания матриц A и B**

☒ Задать матрицы A и B с помощью базовой матрицы D  
☐ Задать матрицы A и B с помощью собственных чисел

**Базовая матрица D =**

0.04377	0.3508	0.4725	-0.7318	-0.8925
-0.3283	-0.06306	0.1237	-0.5748	-0.1166
-0.6487	0.8243	-0.6316	0.7899	-0.9734
-0.5821	-0.792	0.1944	-0.8571	0.7944
0.8103	0.4911	-0.4001	-0.515	-0.6067

**Введите коэффициенты в разложении матриц A и B по степеням матрицы D**

A = -0.8133 E + -0.3853 D + -0.08788 D^2 + -0.7967 D^3 + 0.9908 D^4 + -0.3358 D^5  
B = -0.4053 E + -0.8759 D + -0.4035 D^2 + -0.9073 D^3 + 0.01086 D^4 + 0.5229 D^5

Результаты вычислений  
(0, 1.0962)  
(0, 1.0962)  
(0, Inf)  
Empty set  
(0, 2.8582)

**Уравнение неустойчиво при любом tau!**  
  
Empty set

Очистить    Заполнить    Рассчитать...    Закрыть все графики

Рис. 2.1. Главное окно программы «Анализ устойчивости» при задании матриц с помощью базовой матрицы

кнопкой «Заполнить», для ввода новых значений существует кнопка «Очистить».

Все элементы пользовательского интерфейса снабжены всплывающими подсказками.

После ввода данных в обоих случаях для начала расчёта необходимо нажать на кнопку «Рассчитать...». Показанное на рисунке 2.3 вспомогательное окно представляет результаты расчётов графически: в трёхмерном пространстве изображаются конус устойчивости и системы точек, расположение которых позволяет сделать вывод об устойчивости исследуемого уравнения.

**Анализ устойчивости уравнения**  
 $x'(t) + Ax(t) + Bx(t-\tau) = 0$

Входные данные  
**Размерность = 3**

**Выберите способ задания матриц A и B**

☐ Задать матрицы A и B с помощью базовой матрицы D  
☒ Задать матрицы A и B с помощью собственных чисел

Собственные числа матрицы A	Собственные числа матрицы B
$\lambda_1 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.0508</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">-1.6219</div> $ * i$	$\mu_1 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.0903</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">-0.1592</div> $ * i$
$\lambda_2 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.0508</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">1.6219</div> $ * i$	$\mu_2 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.0903</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.1592</div> $ * i$
$\lambda_3 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">-0.0153</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0</div> $ * i$	$\mu_3 = $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0.0716</div> $ + $ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px 10px; text-align: center;">0</div> $ * i$

Результаты вычислений

(0, 0.44345) U (2.3348, 3.9385) U (6.6798, 7.4336)  
(0, 0.44345) U (2.3348, 3.9385) U (6.6798, 7.4336)  
(0, 19.3784)

Уравнение устойчиво при  $\tau$ , лежащем в одном из интервалов:  
(0, 0.44345) U (2.3348, 3.9385) U (6.6798, 7.4336)

Очистить
Заполнить
Рассчитать...
Закрыть все графики

Рис. 2.2. Главное окно программы «Анализ устойчивости» при задании собственных чисел матриц вручную

Синим цветом обозначаются точки, находящиеся в конусе устойчивости и соответствующие устойчивости, а красным — находящиеся вне конуса и соответствующие неустойчивости. При этом есть возможность использовать стандартный набор инструментов графического окна пакета MATLAB. На панели «Результаты вычислений» отображается отчёт о результатах вычислений и выводится сообщение об устойчивости уравнения (2.1). Причём, если существует хотя бы один промежуток значений  $\tau$ , обеспечивающих устойчивость уравнения, то будут показаны все необходимые промежутки (рис. 2.1), если нет — будет выдано сообщение о неустойчивости уравнения при всех значениях запаздывания (рис. 2.2).

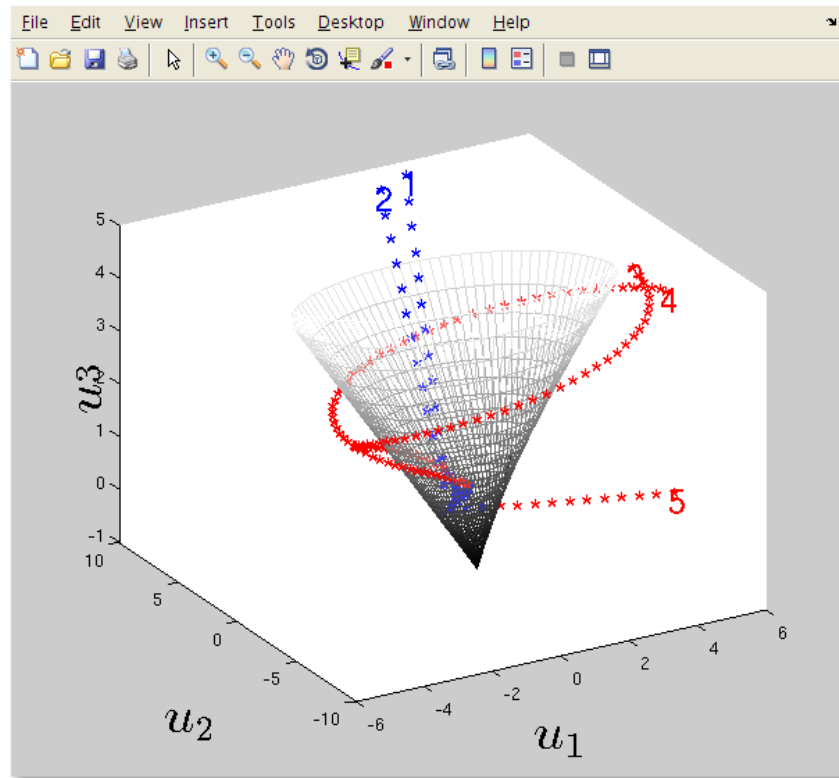


Рис. 2.3. Графический вывод результатов вычисления

После проведения расчётов пользователь может изменить входные параметры и ещё раз выполнить расчёт устойчивости. Появится ещё одно окно с графиком, а отчёт в главном окне будет обновлён. Данную процедуру можно проделывать сколько угодно раз. Для удобства пользователя была создана кнопка «Заккрыть все графики», позволяющая закрыть все дополнительные окна. При вводе некорректных данных программа выдаёт различные сообщения об ошибках. Например, следующее сообщение может быть получено при вводе некорректных значений в матрицу (рис. 2.4).

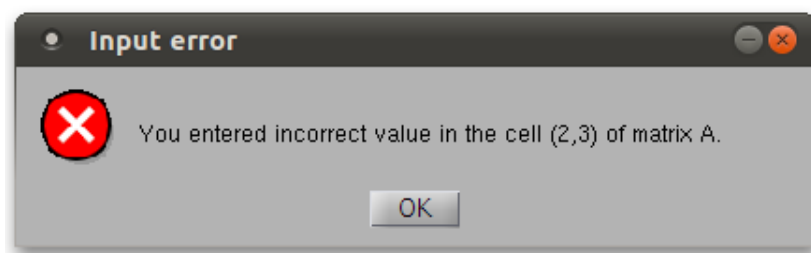


Рис. 2.4. Сообщение об ошибке: введены некорректные данные

### **2.2.3 Используемые технические средства**

Программа «Анализ устойчивости» разрабатывалась в высокоуровневой среде для математических вычислений MATLAB 7.11.0 (R2010b) с использованием matlab APY для создания графического интерфейса пользователя (GUI). Пользовательская версия программного продукта поставляется в скомпилированном с помощью компилятора msc, входящего в дистрибутив. Для запуска программы нужен установленный Matlab соответствующей версии либо библиотеки Matlab, которые можно получить на официальном сайте (<http://www.mathworks.com/>).

Программа зарегистрирована в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО), информация о ней представлена в [11], а пользовательская версия программы доступна по электронному адресу [13].

## Глава 3

# **Численный и теоретический анализ устойчивости нейронных сетей с неограниченным количеством нейронов**

### **3.1 Постановка задачи и алгоритм диагностирования устойчивости кольцевой сети с неограниченным количеством нейронов**

Много работ посвящено проблеме устойчивости нейронных сетей, состоящих из двух нейронов (например, [19, 44]). Проблема устойчивости нейронной сети круговой архитектуры с запаздывающим взаимодействием при количестве нейронов больше двух исследуется, например, в работах [33–35, 45–47]. Изучаемая нами в этой главе модель наиболее близка к модели работ [34, 35]. В отличие от работ [34, 35], мы не вводим запаздывание в реакцию нейрона на собственный сигнал (selfconnection), зато рассматриваем несимметричное взаимодействие нейрона с правым и левым соседом. Особенность нашего подхода в этом разделе и вообще в этой главе — рассмотрение конфигураций с неограниченным количеством нейронов. Методы нашего исследования основаны на конусах устойчивости, введенных в главе 1 диссертации (см. также [7]), но требуют изменения в связи с спецификой задачи о неограниченности количестве нейронов в кольце. Аналогичные методы применены в [48] для изучения устойчивости дискретных моделей круговой системы нейронов (см. также [47, 49]).

Переход от нелинейных моделей нейронных сетей с одним запаздыванием к линейным уравнениям посредством линеаризации описан в разделе



ле 1.1 диссертации. Аналогично этому следующее дифференциальное уравнение описывает кольцевую нейронную сеть (рис. 3.1) с запаздыванием  $\tau_1$  во взаимодействии нейрона с левым соседним нейроном и  $\tau$  с правым:

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t - \tau_1) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n). \quad (3.1)$$

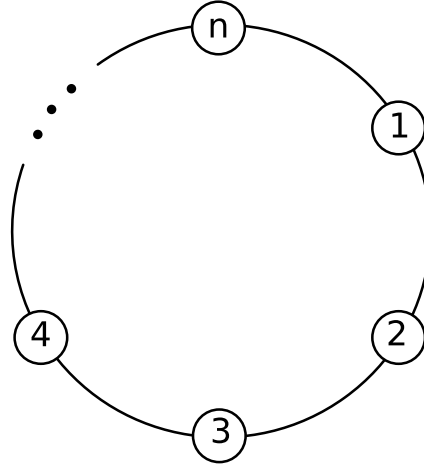


Рис. 3.1. Круговая система нейронов

Здесь  $x_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) сигнал  $j$ -го нейрона, действительные коэффициенты  $a$  и  $b$  характеризуют интенсивности взаимодействия нейрона с правым и левым соседними нейронами соответственно. Общее аналитическое исследование устойчивости системы (3.1) вряд ли возможно, поскольку даже скалярное уравнение  $\dot{x}(t) + a x(t - \tau_1) + b x(t - \tau) = 0$  имеет, как выяснилось (см. [21, 22]), очень сложную структуру области устойчивости в пространстве параметров. Поэтому основными моделями в нашем исследовании будут два упрощенных варианта систем (3.1), в первом из которых  $\tau_1 = 0$ , во втором  $\tau_1 = \tau$ :

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n), \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t - \tau) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n). \quad (3.3)$$

Уравнение (3.2) соответствует малым запаздываниям взаимодействия нейронов с правыми соседними нейронами, а (3.3) — близким запаздываниям

взаимодействия нейронов с правыми и левыми соседями. В обоих уравнениях интенсивность взаимодействия нейронов с правыми и левыми соседями не обязательно одинакова. Последнее свойство отличает нашу модель от модели работ [34, 35]. Еще одно отличие в том, что у нас отсутствует запаздывание в реакции нейрона на собственный сигнал (selfconnection).

Системы (3.2), (3.3) принадлежат классу систем вида

$$\dot{x}(t) + Ax(t) + Bx(t - \tau) = 0, \quad (3.4)$$

где  $n \times n$  матрицы  $A, B$  одновременно триангулируемы. В главе 1 и статье автора диссертации [7] указан метод диагностики устойчивости таких систем с помощью конусов устойчивости.

Введем специальное обозначение для  $n \times n$  матрицы оператора сдвига строк:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

В матричном виде уравнения (3.2), (3.3) соответственно будут иметь вид

$$\dot{x}(t) + (I + aP)x(t) + bP^{n-1}x(t - \tau) = 0, \quad (3.6)$$

$$\dot{x}(t) + Ix(t) + (aP + bP^{n-1})x(t - \tau) = 0, \quad (3.7)$$

где  $I$  есть единичная  $n \times n$  матрица,  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ .

Пусть матрицы  $A, B$  в уравнении (3.4) приводятся одной трансформирующей матрицей к треугольным формам  $A_T, B_T$  с диагональными элементами  $\lambda_j, \mu_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) соответственно.

Построим  $n$  точек  $M_j = (u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}) \in \mathbb{R}^3$ , так что

$$u_{1j} + iu_{2j} = \tau\mu_j \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_j), \quad u_{3j} = \tau \operatorname{Re} \lambda_j, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.8)$$

В силу результатов главы 1 диссертации (см. также [7]), система (3.4) асимптотически устойчива тогда и только тогда, когда все точки  $M_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) лежат внутри конуса устойчивости. Если хотя бы одна из точек  $M_j$  лежит вне конуса, то (3.4) неустойчива.

В разделах 2.1 и 2.2 диссертации мы описали алгоритм и программный продукт «Анализ устойчивости» (см. также [14]), предназначенный для диагностирования устойчивости системы (3.4). Программа по согласованному спектру  $\lambda_j, \mu_j$   $1 \leq j \leq$  матриц  $A, B$  возвращает объединение интервалов

$$T = \cup_{k=1}^N (\tau_k, \tau_{k+1}), \quad (3.9)$$

такое что если  $\tau \in T$ , то система (3.4) асимптотически устойчива, а если  $\tau \notin [\tau_k, \tau_{k+1}]$  при любом  $k$  ( $1 \leq k \leq N$ ), то (3.4) неустойчива.

Для проверки устойчивости систем (3.2) и (3.3) при неограниченном порядке  $n$  требуется модификация алгоритма, первоначально предназначенного для общей системы (3.4). В настоящем разделе мы указываем такой алгоритм.

Собственные числа матрицы  $P$  суть  $\lambda_j = \exp(i\frac{2\pi j}{n})$ ,  $1 \leq j \leq n$ . Поэтому при одновременном приведении четырех циркулянтных матриц  $(I + aP)$ ,  $bP^{n-1}$ ,  $I$ ,  $aP + bP^{n-1}$  к диагональному виду их диагональные элементы равны соответственно

$$\lambda'_j = 1 + a \exp(i\frac{2\pi j}{n}), \quad \mu'_j = b \exp(-i\frac{2\pi j}{n}), \quad 1 \leq j \leq n, \quad (3.10)$$

$$\lambda''_j = 1, \quad \mu''_j = a \exp(i\frac{2\pi j}{n}) + b \exp(-i\frac{2\pi j}{n}), \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.11)$$

Для изучения устойчивости уравнений (3.5), (3.6) строим систему точек  $M'_j = (u'_{1j}, u'_{2j}, u'_{3j}) \in \mathbb{R}^3$ , определенных равенствами (см. (3.8), (3.10))

$$u'_{1j} + iu'_{2j} = \tau b \exp(i(-\frac{2\pi j}{n} + a\tau \sin \frac{2\pi j}{n})), \quad u'_{3j} = \tau(1 + a \cos \frac{2\pi j}{n}), \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.12)$$

Аналогично, для системы (3.5), (3.7) точки  $M_j'' = (u_{1j}'', u_{2j}'', u_{3j}'') \in \mathbb{R}^3$ , определены равенствами (см. (3.8), (3.11))

$$u_{1j}'' + iu_{2j}'' = \tau a (\exp(i\frac{2\pi j}{n}) + b \exp(-i\frac{2\pi j}{n})), \quad u_{3j}'' = \tau, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.13)$$

Для анализа устойчивости систем (3.5), (3.6) с большим  $n$  вместо дискретной системы точек  $M_j$  естественно ввести непрерывную замкнутую кривую  $M'(t) = (u_1'(t), u_2'(t), u_3'(t))$ , положив  $t = \frac{2\pi j}{n}$  в (3.12):

$$\begin{aligned} u_1'(t) + iu_2'(t) &= \tau b \exp(i(-t + a\tau \sin t)), \\ u_3'(t) &= \tau(1 + a \cos t), \quad 0 \leq t \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Аналогично, для (3.5), (3.7) строим кривую  $M''(t) = (u_1''(t), u_2''(t), u_3''(t))$ :

$$u_1''(t) + iu_2''(t) = \tau(a \exp(it) + b \exp(-it)), \quad u_3''(t) = \tau, \quad 0 \leq t \leq 2\pi. \quad (3.15)$$

При  $n \rightarrow \infty$  точки  $M_j$ , определенные равенствами (3.12), образуют плотное на кривой (3.14) множество. Поэтому вопрос об устойчивости системы (3.5), (3.6) сводится к геометрической проблеме. Если все точки кривой (3.14) лежат внутри конуса устойчивости (1.21), (1.22) (см. определение 1.2), то система (3.5), (3.6) устойчива при любом  $n$ , а если хотя бы одна точка кривой (3.14) лежит вне конуса устойчивости, то система (3.5), (3.6) неустойчива при всех достаточно больших значениях  $n$  (рис. 3.2).

В свою очередь, эта геометрическая задача может быть решена численными методами. Для системы (3.5), (3.6) при различных значениях  $t \in [0, 2\pi]$  мы вычисляем  $\arg(u_1'(t) + iu_2'(t))$  согласно (3.14) и находим на конусе устойчивости на высоте  $h = u_3'(t)$  точку или две точки с тем же аргументом. Сравнение модулей точек на кривой и конусе дает ответ на вопрос, устойчива ли система (3.5), (3.6). Аналогично изучается система (3.5), (3.7).

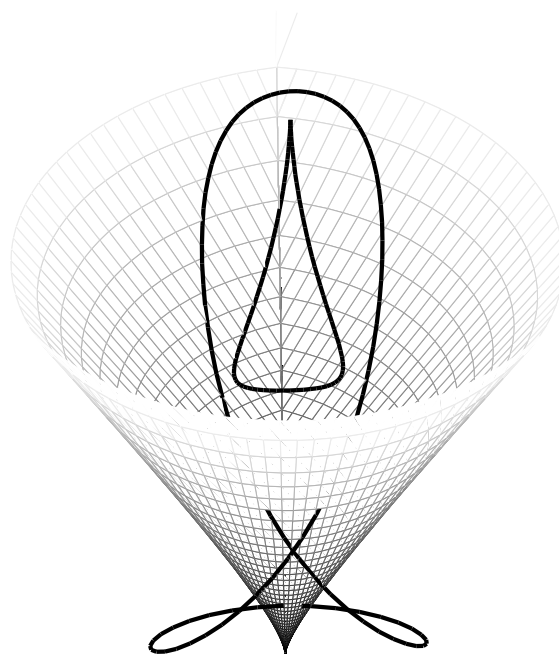


Рис. 3.2. Конус устойчивости и две кривые (3.14). Одна кривая для  $\tau = 1.5$ ,  $a = -1.4$ ,  $b = 0.7$ , находится частично вне конуса устойчивости, следовательно, система (3.5), (3.6) неустойчива при достаточно больших  $n$ . Вторая кривая для  $\tau = 2$ ,  $a = 0.5$ ,  $b = -0.2$ , находится полностью внутри конуса устойчивости, следовательно, система (3.5), (3.6) устойчива при любом  $n$ .

## 3.2 Программный продукт «Устойчивость нейронных сетей»

### 3.2.1 Функциональное назначение и область применения программы

На основе модификации алгоритма исследования устойчивости для систем с неограниченным количеством нейронов, описанной в предыдущем разделе, автором была разработана программа «Устойчивость нейронных сетей», которая по коэффициентам уравнений (3.2), (3.3) и величине запаздывания выдаёт сообщение об устойчивости соответствующей кольцевой системы нейронов. Продукт может применяться для получения вывода об устойчивости

конкретных систем, а также для регулирования коэффициентов модели с целью получения устойчивого решения.

Программа выполнена в пакете MATLAB 7.11.0 (R2010b) посредством matlab APP для создания графического интерфейса пользователя (GUI). Исходный код программы представлен в приложении Б.

Программа зарегистрирована в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО), информация о ней представлена в [12], а пользовательская версия программы доступна по электронному адресу [14]. Примеры работы программы «Устойчивость нейронных сетей» и особенности лежащего в её основе алгоритма представлены также в [50].

### 3.2.2 Использование

Все входные параметры задаются на одноимённой панели, показанной на рисунке 3.3.

Прежде всего пользователю предлагается выбрать конфигурацию нейронной сети. В программе доступны два варианта кругового соединения нейронов: с малым запаздыванием взаимодействия с правыми соседями (уравнение (3.2)) и с одинаковым запаздыванием взаимодействия с правыми и левыми соседями (уравнение (3.3)). Выбирая первую или вторую радиокнопку, пользователь определяет, для какой именно модели будет проводиться анализ устойчивости. На рисунке 3.3 выбрана первая конфигурация, а на рисунке 3.4 — вторая.

Ниже, на панели ввода представлено название, описание и рисунок выбранной конфигурации. Пользователю необходимо ввести коэффициенты уравнения, соответствующие выбранной конфигурации. Ввести данные коэффициенты можно двумя способами: вручную или при помощи кнопки «Запол-

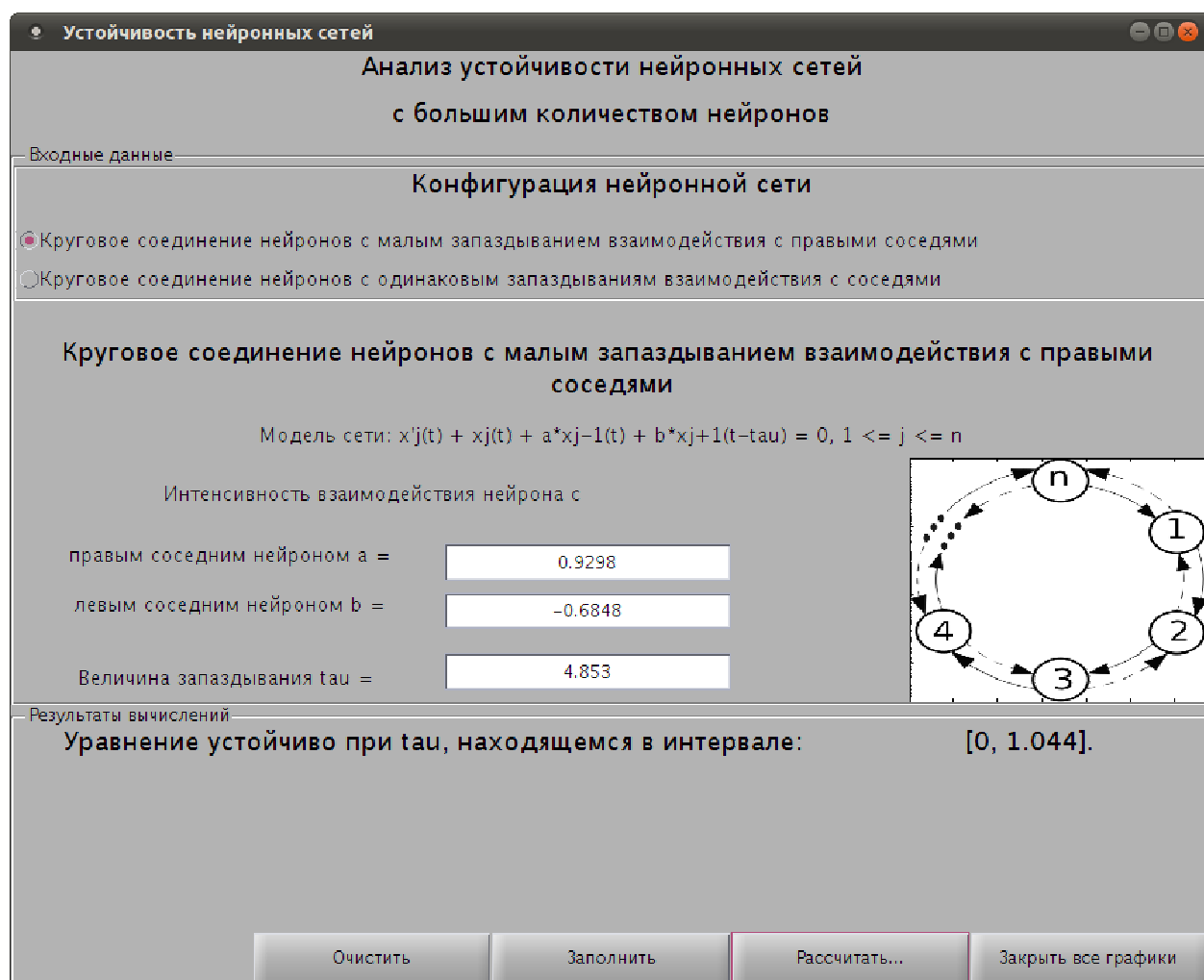


Рис. 3.3. Главное окно программы «Устойчивость нейронных сетей» при выборе первой конфигурации

нить», которая генерирует случайные числа в каждой ячейке. Для очистки значений коэффициентов используется кнопка «Очистить».

Все элементы пользовательского интерфейса снабжены всплывающими подсказками.

После ввода данных пользователю необходимо нажать на кнопку «Рассчитать...». Вспомогательное окно (рис. 3.5) графически представляет результаты расчётов: в трёхмерном пространстве строятся конус устойчивости и системы точек, взаимное расположение которых указывает на устойчивость или неустойчивость данного уравнения. Чёрным цветом обозначаются точки, находящиеся внутри конуса устойчивости и соответствующие устойчивости,

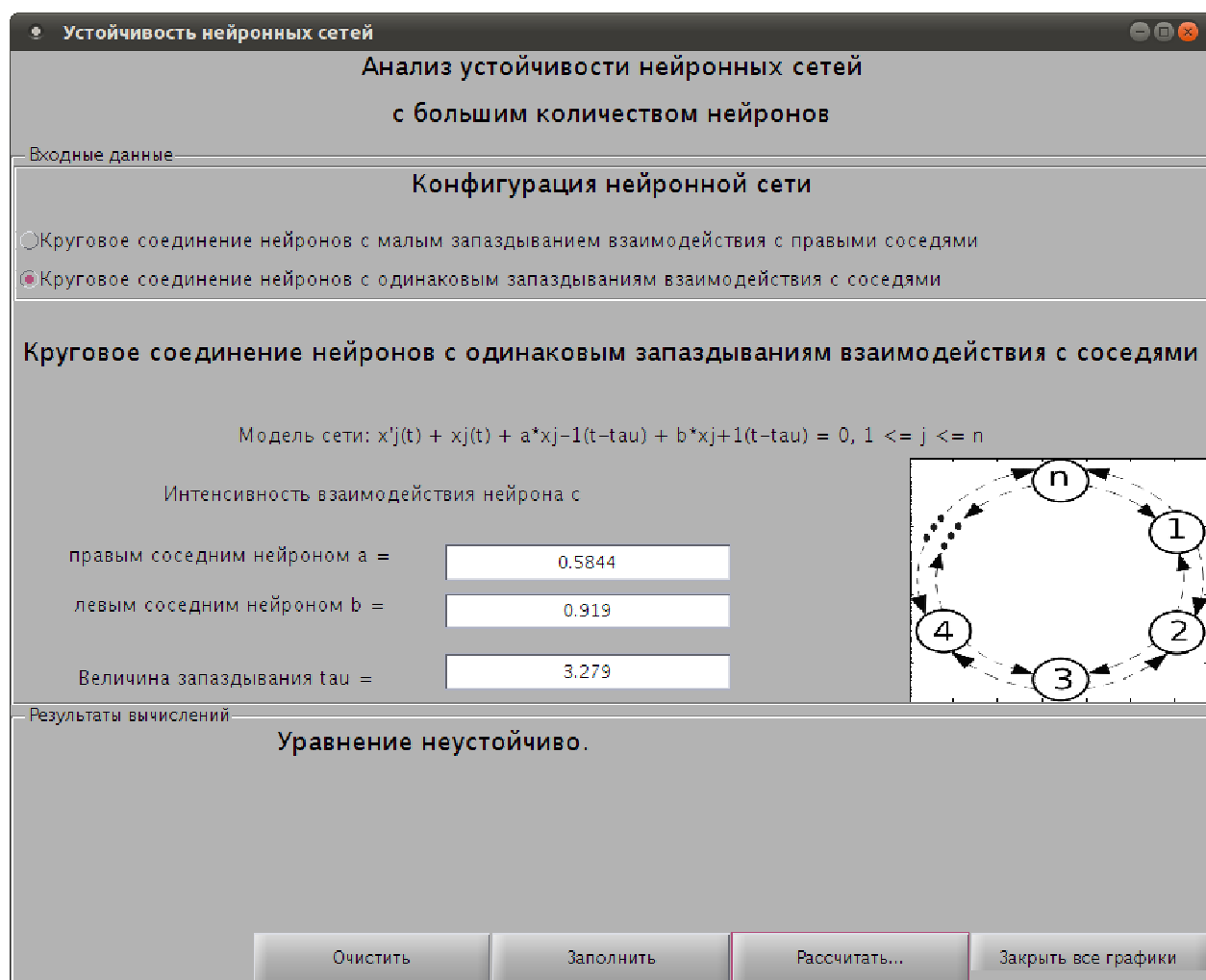


Рис. 3.4. Главное окно программы «Устойчивость нейронных сетей» при выборе второй конфигурации

а красным — находящиеся вне конуса и соответствующие неустойчивости. На панели «Результаты вычислений» отображается отчёт о результатах вычислений и выводится сообщение об устойчивости уравнения. Как и в программе «Анализ устойчивости» (см. раздел 2.2 главы 2), выходными данными служат промежутки значений запаздывания  $\tau$ , обеспечивающих устойчивость исследуемого уравнения (см. рис. 3.3), если такие промежутки существуют. В противном случае будет выдано сообщение о неустойчивости уравнения при всех значениях запаздывания (см. рис. 3.4).

Пользователь имеет возможность изменить входные параметры и провести исследование устойчивости другой системы нейронов с новыми парамет-



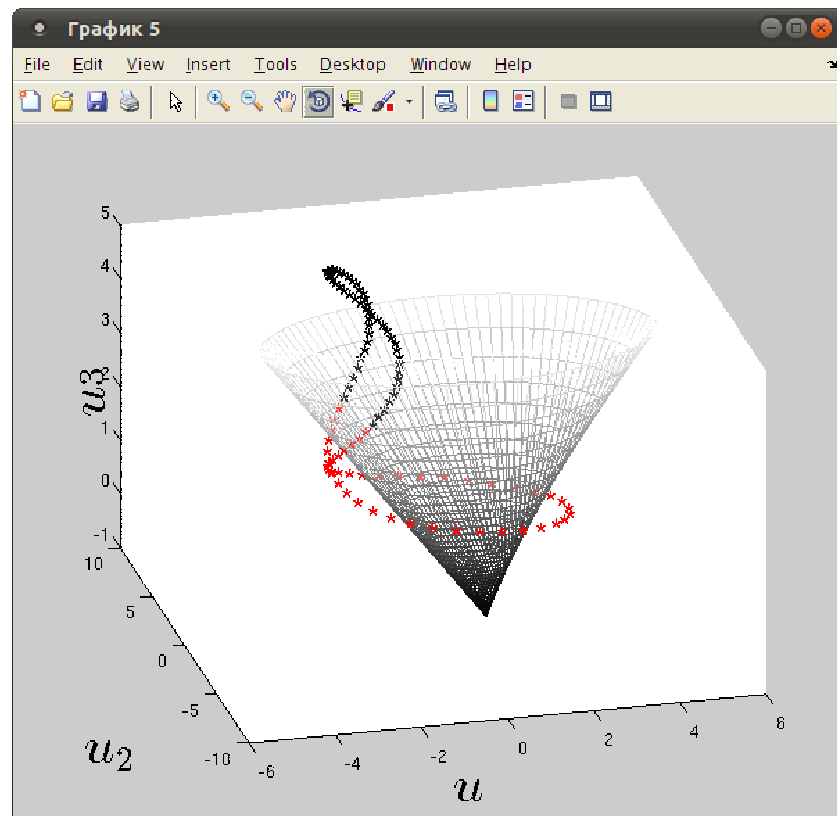


Рис. 3.5. Графический вывод результатов вычисления

рами. При этом появляется ещё одно окно с графиком, а также обновляется отчёт в главном окне. Кнопка «Заккрыть все графики» позволяет закрыть все дополнительные окна.

Программа анализирует входные данные, и при вводе некорректных данных выдаёт сообщения об ошибках. На рис. 3.6 представлено сообщение, которое будет получено при вводе некорректных значений в поле ввода параметра  $a$ .

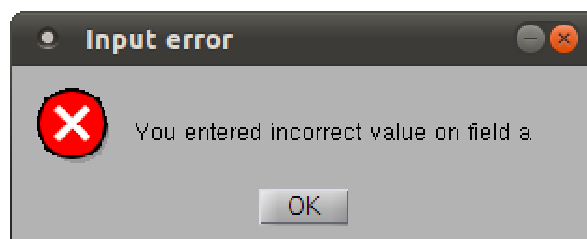


Рис. 3.6. Сообщение об ошибке: введены некорректные данные

### 3.3 Результаты исследования устойчивости кольцевой сети нейронов с неограниченным количеством нейронов

В работе Mori и др. [24] доказано, что устойчивость уравнения (3.4), независимая от запаздывания, гарантирована при условии

$$\min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \alpha_{jj} - \sum_{k=1, k \neq j}^n |\alpha_{jk}| \right\} > \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{k=1}^n |\beta_{jk}|, \quad (3.16)$$

где  $\alpha_{jk}, \beta_{jk}$  суть элементы матриц  $A, B$  соответственно. Отсюда вытекает следующее Предложение.

**Предложение 3.1.** *Если  $|a| + |b| < 1$ , то системы (3.5), (3.6) и (3.5), (3.7) асимптотически устойчивы при любом  $n$  и любом  $\tau \geq 0$ .*

Утверждение 3.1 также несложно вывести из Теоремы 1.5 раздела 1.4 диссертации.

**Теорема 3.1.** *Если  $|a + b| > 1$ , то системы (3.5), (3.6) и (3.5), (3.7) неустойчивы при любом  $\tau > 0$ , если  $n$  достаточно велико.*

Доказательство теоремы 3.1 будет дано в разделе 3.6. Предложение 3.1 и теорема 3.1 не дают информации о поведении систем (3.5), (3.6) и (3.5), (3.7) для случая, когда выполнены одновременно неравенства  $|a + b| < 1$  и  $|a| + |b| > 1$ . Для этого случая мы применили исходный код программны «Устойчивость нейронных сетей».

Здесь мы представляем результаты применения программного продукта, Предложения 3.1 и Теоремы 3.1 (см. также [51]).

На рисунках 3.7, 3.8 показаны области  $D_\tau$  в плоскости параметров  $(a, b)$  для некоторых значений  $\tau$ . Область  $D_\tau$  является расширением области, заданной неравенством  $|a| + |b| < 1$ , на северо-запад и юго-восток до границ,

зависящих от  $\tau$ . Если точка  $(a, b)$  лежит внутри  $D_\tau$  на Рис. 3.7, то система (3.5), (3.6) асимптотически устойчива. Если  $(a, b)$  лежит вне  $D_\tau$  на рисунке 3.7, то система (3.5), (3.6) неустойчива при достаточно больших  $n$ . Аналогичные утверждения верны для рисунка 3.8 и системы (3.5), (3.7). Область  $D_\tau$  центрально-симметрична: если  $(a, b) \in D_\tau$ , то  $(-a, -b) \in D_\tau$ . При одинаковых  $\tau$  область устойчивости для системы (3.5), (3.6) шире области для (3.5), (3.7).

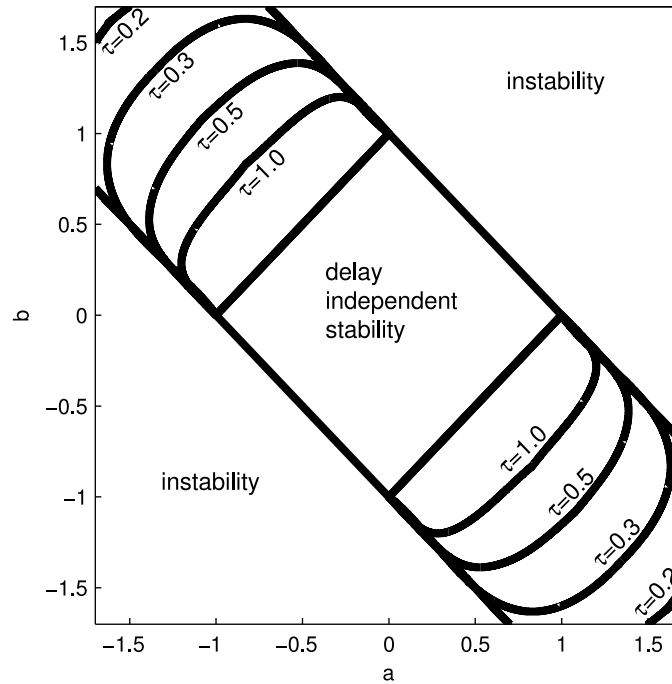


Рис. 3.7. Области устойчивости для системы (3.5), (3.6)

Для обеих систем важна прямая  $a = -b$  в плоскости  $(a, b)$ , в окрестности которой сконцентрированы точки устойчивости систем. Поэтому естественно рассмотреть следующие две системы уравнений:

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a(x_{j-1}(t) - x_{j+1}(t - \tau)) = 0 \quad (j \bmod n), \quad (3.17)$$

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a(x_{j-1}(t - \tau) - x_{j+1}(t - \tau)) = 0 \quad (j \bmod n). \quad (3.18)$$

**Определение 3.1.** Границей устойчивости системы (3.17) для больших  $n$  назовем такое число  $a_1(\tau) \in \mathbb{R}$ , что если  $|a| < a_1(\tau)$ , то (3.17)

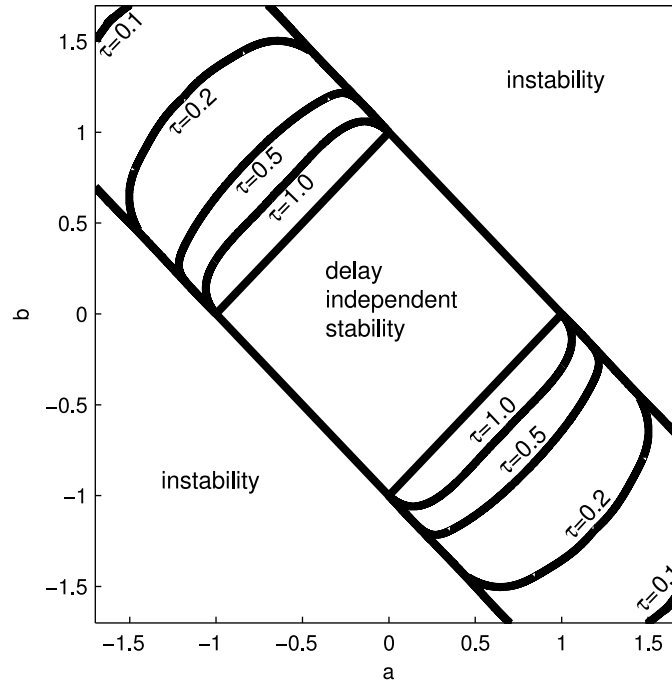


Рис. 3.8. Области устойчивости для системы (3.5), (3.7)

устойчива при любом  $n$ , а если  $|a| > a_1(\tau)$ , то (3.17) неустойчива при всех достаточно больших  $n$ . Аналогично определим  $a_2(\tau)$  как границу устойчивости (3.18) для больших  $n$ .

В таблице 3.1 представлены результаты анализа устойчивости систем (3.17), (3.18) с помощью программного продукта «Устойчивость нейронных сетей».

Очевидно,  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} a_1(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} a_2(\tau) = 1/2$ .

Не столь очевидно поведение систем (3.17), (3.18) при  $\tau \rightarrow 0$ , которое рассматривается в следующей теореме.

### Теорема 3.2.

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} a_1(\tau)\sqrt{2\tau} = \lim_{\tau \rightarrow 0} a_2(\tau)2\sqrt{\tau} = 1. \quad (3.19)$$

Доказательство теоремы 3.2 дано в разделе 3.6. Таблица 3.1 подтверждает оценки теоремы 3.2. Действительно, согласно таблице 3.1, при  $\tau = 0.01$  имеем  $a_1(\tau)\sqrt{2\tau} \simeq 1.0017$ ,  $a_2(\tau)2\sqrt{\tau} \simeq 1.0033$ .

Таблица 3.1. Границы областей устойчивости для систем (3.17), (3.18)

$\tau$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	3	4
$a_1(\tau)$	7.0830	3.1901	2.2742	1.6337	1.0829	0.8229	0.6597	0.5988	0.5678
$a_2(\tau)$	5.0166	2.2733	1.6337	1.1921	0.8226	0.6595	0.5678	0.5380	0.5244

Для построения областей устойчивости и неустойчивости исследуемых сетей в плоскости параметров (рис. 3.7, 3.8) и составления таблицы 3.1 потребовалось многократное применение программы «Устойчивость нейронных сетей», что послужило толчком к созданию нового программного продукта, который будет подробно описан в главе 4 настоящей диссертации.

### 3.4 Кольцевые сети нейронов с различными коэффициентами демпфирования

До сих пор мы рассматривали кольцевые системы нейронов с единичным коэффициентом при  $x_j(t)$ . В случае, когда этот коэффициент не равен единице, соответствующей заменой переменных мы можем перейти к рассмотренным системам (3.5), (3.6) и (3.5), (3.7). Однако этот случай сам по себе также представляет интерес, и в данном разделе мы изучим изменения областей устойчивости и неустойчивости кольцевой нейронной сети с односторонним запаздыванием при различных коэффициентах демпфирования.

Итак, рассмотрим следующий аналог системы (3.5), (3.6) с  $\gamma \in \mathbb{R}$  и неограниченным количеством нейронов:

$$\dot{x}_j(t) + \gamma x_j(t) + a x_{j-1}(t) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n), \quad (3.20)$$

На рисунке 3.9 представлены области и неустойчивости системы (3.20) при  $\tau = 0.5$  и различных значениях коэффициента  $\gamma$ . Средняя кривая была получена в разделе 3.3 и ограничивает область устойчивости исследуе-

мого уравнения при  $\gamma = 1$ . Остальная часть плоскости  $(a, b)$  соответствует неустойчивости изучаемого уравнения. Эту нейронную сеть также описывает система (3.5), (3.6), подробно изученная в данной главе.

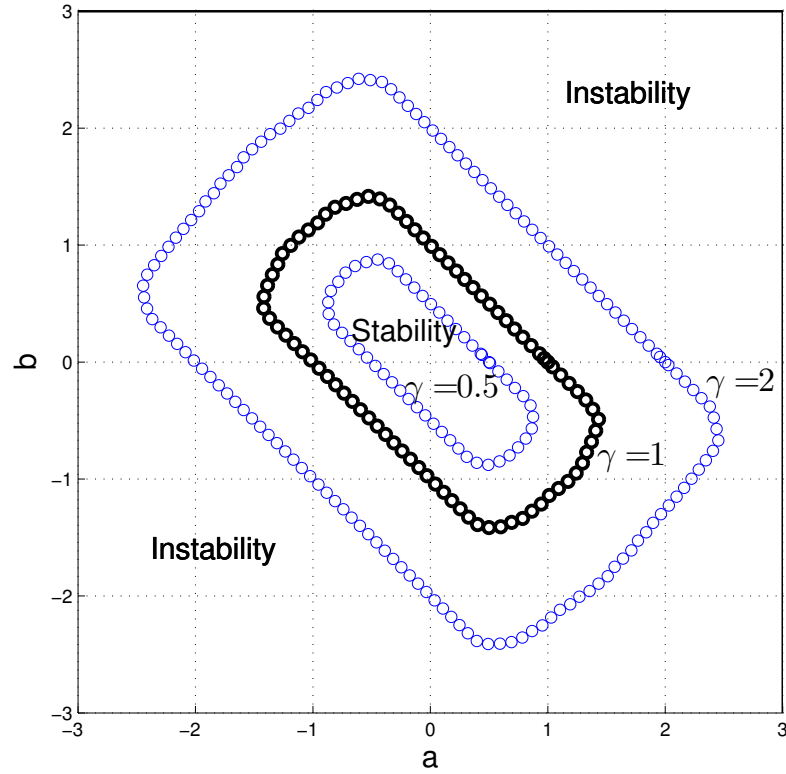


Рис. 3.9. Области устойчивости для системы (3.20) при различных коэффициентах  $\gamma$

Две другие кривые (при  $\gamma = 0.5$  и  $\gamma = 2$ ) находятся внутри и снаружи известной нам границы для  $\gamma = 1$ . Как видно, соответствующие им области устойчивости равномерно сужаются (при  $0 < \gamma < 1$ ) или расширяются (при  $\gamma > 1$ ) относительно основной кривой для  $\gamma = 1$ .

Таким образом, введение некоторого не равного единице коэффициента  $\gamma$  при  $x_j(t)$  не вносит принципиальных изменений в структуру областей устойчивости и неустойчивости исследуемых уравнений, что позволяет нам, не теряя общности, проводить анализ устойчивости известных нам уравнений (3.5), (3.6) и (3.5), (3.7).

### 3.5 Разрыв в кольце: нейронная сеть линейной конфигурации

Выясним, что происходит с устойчивостью, когда разорвана связь между, скажем, первым и последним нейронами в кольцевой сети нейронов (рис. 3.10).

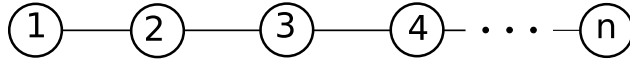


Рис. 3.10. Линейная система нейронов.

В этом случае система (3.5), (3.6) переходит в некоторое уравнение вида (3.4) с матрицами  $A, B$ , которые, вообще говоря, не приводятся одновременно к треугольному виду. Наш метод конусов устойчивости непригоден для анализа устойчивости таких систем. Поэтому мы вынуждены ограничиться анализом системы (3.5), (3.7) с разорванной связью. Итак, рассмотрим следующий аналог системы (3.5), (3.7):

$$\dot{x}_1(t) + x_1(t) + b x_2(t - \tau) = 0,$$

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t - \tau) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0, \quad 2 \leq j \leq (n - 1), \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_n(t) + x_n(t) + a x_{n-1}(t - \tau) = 0, \quad n > 2.$$

Матричная форма уравнения (3.21) такова:

$$\dot{x}(t) + I x(t) + D x(t - \tau) = 0, \quad (3.22)$$

где  $n \times n$  матрица  $D$  имеет вид

$$D = \begin{pmatrix} 0 & b & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a & 0 & b & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.23)$$

Для формулировки следующей теоремы определим функцию  $F(\tau)$  от запаздывания  $\tau \in (0, \infty)$ :

$$F(\tau) = \frac{1}{4 \sin^2 \omega(\tau)}, \quad (3.24)$$

где  $\omega(\tau)$  есть наименьший положительный корень уравнения

$$\tau = \omega \operatorname{tg} \omega. \quad (3.25)$$

- Теорема 3.3.** 1. Если  $|ab| < \frac{1}{4}$ , то система (3.22), (3.23) асимптотически устойчива при любом  $n$  и любом  $\tau \geq 0$ .
2. Если  $ab > \frac{1}{4}$ , то система (3.22), (3.23) неустойчива при любом  $\tau \geq 0$ , если  $n$  достаточно велико.
3. Если  $ab < 0$  и  $|ab| < F(\tau)$ , то система (3.22), (3.23) асимптотически устойчива при любом  $n$ .
4. Если  $ab < 0$  и  $|ab| > F(\tau)$ , то система (3.22), (3.23) неустойчива, если  $n$  достаточно велико.

Доказательство Теоремы 3.3 дано в разделе 3.6. Область устойчивости, независимой от запаздывания, очерченная пунктом 1 Теоремы 3.3, шире области  $|a| + |b| < 1$ , гарантированной достаточным условием (3.16). Результаты Теоремы 3.3 отражены на Рисунке 3.11. Сравнивая Рисунки 3.8 и 3.11, мы видим, что при разрыве кольца нейронов область устойчивости в пространстве параметров увеличивается. Ещё одно наблюдение: в системе (3.22), (3.23)



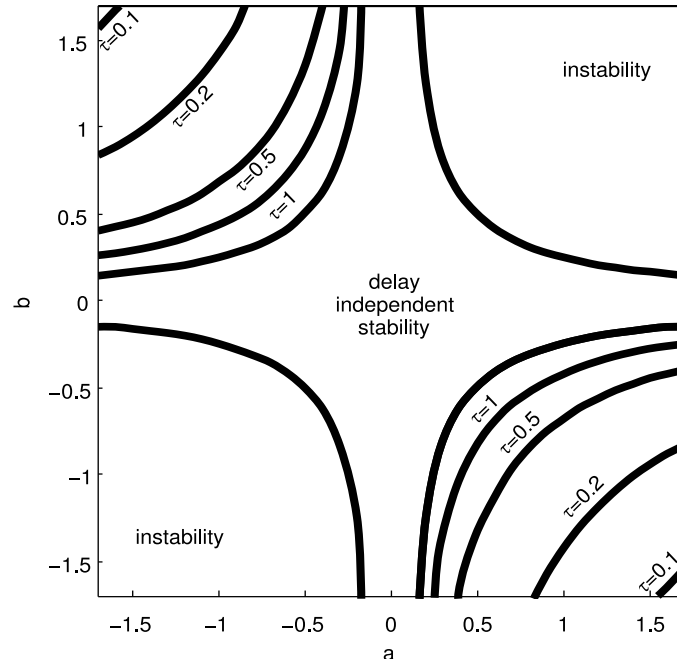


Рис. 3.11. Области устойчивости системы (3.22), (3.23).

при  $a = 0$  (или  $b = 0$ ) Теорема 3.3 гарантирует устойчивость независимо от запаздывания. В интерпретации это означает, что при разрыве кольца нейронов блокировка взаимодействия нейронов с правым (или левым) соседом гарантирует устойчивость при любом запаздывании, что отнюдь неверно для неповрежденного кольца нейронов (см. Теорему 3.1 и Рисунки 2,3).

Рассмотрим вариант  $a = -b$  в (3.22), (3.23). Положим  $H(\tau) = \sqrt{F(\tau)}$  (см. (3.24), (3.25)). Очевидно,  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} H(\tau) = 1/2$  и  $\lim_{\tau \rightarrow 0} H(\tau)2\sqrt{\tau} = 1$ . В системе (3.22), (3.23) с  $a = -b$  функция  $H(\tau)$  играет роль границы устойчивости, аналогичную функции  $a_2(\tau)$  для системы (3.18) (см. Определение 3.1). Сравнение поведения  $H(\tau)$  с  $a_2(\tau)$  (см. (3.19)) обнаруживает весьма малые различия в условиях устойчивости для замкнутой и разорванной цепи нейронов, если соединение каждого нейрона с соседними антисимметрично, то есть при  $a = -b$  в (3.22), (3.23).

## 3.6 Доказательства теорем главы 3

### 3.6.1 Доказательство Теоремы 3.1

Начнем доказательство с замечания, что неравенство

$$u_1 + u_3 \geq 0 \quad (3.26)$$

верно на поверхности конуса устойчивости (1.21), (1.22) (см. определение 1.2) и внутри него. Из (3.14) и  $a + b > 1$  получим

$$u_1'(\pi) + u_3'(\pi) = -\tau(b + a - 1) < 0.$$

Последнее неравенство показывает, что точка  $M'(\pi)$  находится вне конуса устойчивости (см. (3.26)), поэтому при  $a + b > 1$  система (3.5), (3.6) неустойчива, если  $n$  достаточно велико.

Преобразование  $t \rightarrow t + \pi, a \rightarrow -a, b \rightarrow -b$  переводит кривую (3.14) в себя, поэтому область устойчивости системы (3.5), (3.6) центрально-симметрична. Следовательно, и неравенство  $a + b < -1$  обеспечивает неустойчивость системы (3.5), (3.6) при достаточно больших  $n$ . Аналогично, положив в (3.15)  $t = \pi/2$ , докажем неустойчивость (3.5), (3.7) при достаточно больших  $n$  и  $|a + b| > 1$ . Теорема 3.1 доказана.

### 3.6.2 Доказательство Теоремы 3.2

1. Для выяснения асимптотики  $a_1(\tau)$  требуется вычислить точки касания в  $\mathbb{R}^3$  конуса устойчивости с кривой (3.14) при  $a = a_1(\tau)$ ,  $b = -a_1(\tau)$ ,  $t = \pi/2$ . На кривой (3.14)

$$\arg(u_1'(\frac{\pi}{2}) + iu_2'(\frac{\pi}{2})) - \frac{\pi}{2} = \tau a_1(\tau). \quad (3.27)$$

Когда  $\tau \rightarrow 0$  и  $h = u_3(\pi/2) = \tau$ , на конусе (1.21), (1.22)

$$\arg(u_1 + iu_2) - \frac{\pi}{2} = -\omega + \arg(i\omega - \tau) - \frac{\pi}{2} \sim \frac{\tau}{\omega} - \omega. \quad (3.28)$$

Здесь  $\alpha \sim \beta$  означает, что  $(\alpha/\beta) \rightarrow 1$ . Касание кривой и конуса влечет равенство аргументов (3.27), (3.28), а также равенство  $|u_1 + iu_2| = |u'_1(\pi/2) + iu'_2(\pi/2)|$ . Поэтому

$$\tau a_1(\tau) \sim \frac{\tau}{\omega} - \omega, \quad \tau a_1(\tau) = \sqrt{\omega^2 + \tau^2} \sim \omega. \quad (3.29)$$

Из (3.29) получим  $\omega \sim \sqrt{\tau/2}$ , что дает требуемую оценку  $a_1(\tau) \sim 1/\sqrt{2\tau}$ . 2. Для выяснения асимптотики  $a_2(\tau)$  положим  $a = a_2(\tau)$ ,  $b = -a_2(\tau)$  в (3.15). Получим сегмент

$$u_1''(t) = 0, \quad u_2''(t) = 2\tau a_2(\tau) \sin t, \quad u_3''(t) = 0, \quad 0 \leq t \leq 2\pi. \quad (3.30)$$

На конусе (1.21), (1.22) положим  $u_3 = \tau$ ,  $u_1 = 0$ . Получим  $\omega^2 \sim \tau$ , поэтому

$$u_2 = \omega \cos \omega + \tau \sin \omega \sim \sqrt{\tau}. \quad (3.31)$$

Из (3.31) и (3.30) при  $t = \pi/2$  получим  $a_2(\tau) \sim 1/(2\sqrt{\tau})$ . Теорема 3.2 доказана.

### 3.6.3 Доказательство Теоремы 3.3

Начнем доказательство Теоремы 3.3 с леммы.

**Лемма 3.1.** Для любого натурального  $n$  собственные числа  $n \times n$  матрицы  $D$  (см. (3.23)) суть

$$\mu_{jn} = 2\sqrt{ab} \cos \frac{\pi j}{n+1}, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.32)$$

**Доказательство.** Характеристический многочлен матрицы  $D$  (см. (3.23))  $D_n(\mu) = |\mu I - D|$  удовлетворяет соотношениям ( $n = 1, 2, \dots$ )

$$D_1(\mu) = \mu, \quad D_2(\mu) = \mu^2 - ab, \quad D_{n+2}(\mu) = \mu D_{n+1}(\mu) - ab D_n(\mu). \quad (3.33)$$

При  $ab = 0$  заключение леммы очевидно. Пусть  $ab \neq 0$ . Сделаем замену переменной и построим новую последовательность функций  $U_n(y)$ :

$$\mu = 2y\sqrt{ab}, \quad D_n(2y\sqrt{ab}) = (\sqrt{ab})^n U_n(y). \quad (3.34)$$

Из (3.33) и (3.34) выведем

$$U_1(y) = 2y, \quad U_2(y) = 4y^2 - 1, \quad U_{n+2}(y) = 2yU_{n+1}(y) - U_n(y), \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.35)$$

Равенства (3.35) описывают многочлены Чебышева второго рода  $U_n(y)$ , нули которых таковы:

$$y_{jn} = \cos \frac{\pi j}{n+1}, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (3.36)$$

Из (3.36) и (3.34) получим требуемое. Лемма 3.1 доказана.  $\blacksquare$

Продолжим доказательство Теоремы 3.3. Собственные числа  $n \times n$  матрицы  $E$  равны  $\lambda_{jn} = 1$ . Поэтому из (3.32) получим при  $|ab| < 1/4$

$$\frac{|\mu_{jn}|}{\operatorname{Re} \lambda_{jn}} = 2\sqrt{ab} \left| \cos \frac{\pi j}{n+1} \right| < 1, \quad (3.37)$$

что достаточно для асимптотической устойчивости, независимой от запаздывания (см. Теорему 1.5). Пункт 1 Теоремы 3.3 доказан.

Для доказательства пунктов 2-4 Теоремы 3.3 построим точки  $M_{jn} = (u_{1jn}, u_{2jn}, u_{3jn}) \in \mathbb{R}^3$  ( $1 \leq j \leq n$ ), такие что (см. (3.32))

$$u_{1jn} + iu_{2jn} = \tau \mu_{jn} \exp(i\tau \operatorname{Im} \lambda_{jn}) = 2\tau\sqrt{ab} \cos \frac{\pi j}{n+1},$$

$$u_{3jn} = \tau \operatorname{Re} \lambda_{jn} = \tau. \quad (3.38)$$

Пусть  $ab > 1/4$ . Тогда по (3.38) найдётся такое  $n_0$ , что для любого  $n > n_0$

$$u_{1nn} = 2\tau\sqrt{ab} \cos \frac{\pi n}{n+1} < -\tau. \quad (3.39)$$

При этом  $u_{2nn} = 0$ ,  $u_{3nn} = \tau$ . Но на поверхности и внутри конуса устойчивости (1.21), (1.22) на высоте  $u_3 = \tau$  имеем

$$u_1 \geq -u_3 = -\tau. \quad (3.40)$$

Сравнивая (3.40) с (3.39), выясняем, что точка  $M_{nn}$  при  $n > n_0$  лежит вне конуса устойчивости. Поэтому система (3.22), (3.23) неустойчива при достаточно больших  $n$ . Пункт 2 Теоремы 3.3 доказан.

Из (3.38) и Леммы 3.1 при  $ab < 0$  получим

$$u_{1jn} = 0, \quad u_{2jn} = 2\tau\sqrt{|ab|}\cos\frac{\pi j}{n+1}, \quad u_{3jn} = \tau. \quad (3.41)$$

В то же время на поверхности конуса устойчивости на высоте  $u_3 = \tau$  при  $u_1 = 0$

$$|u_2| = \frac{\omega}{\cos\omega}, \quad (3.42)$$

где параметр  $\omega$  ввиду  $u_1 = 0$  удовлетворяет условию (3.25). Теперь из (3.41), (3.24) и (3.25) получим

$$u_{2jn} = \tau \cos\frac{\pi j}{n+1} \sqrt{\frac{|ab|}{F(\tau)}} \frac{1}{\sin\omega}, \quad (3.43)$$

Если  $|ab| < F(\tau)$ , то из (3.43) и неравенства  $\mu_{jn} < 2$  (см. Лемму 3.1) вытекает  $|u_{2jn}| < |u_2|$  при любых  $j, n$ , поэтому все точки  $M_{jn}$  лежат внутри конуса устойчивости, следовательно, система (3.22), (3.23) асимптотически устойчива при любых  $n$ . Пункт 3 Теоремы 3.3 доказан.

Пусть  $|ab| > F(\tau)$ . Тогда найдется такое значение  $n_0$ , что  $\cos\frac{\pi}{n+1} > \sqrt{\frac{F(\tau)}{|ab|}}$  при любом  $n > n_0$ . Ввиду (3.41) отсюда следует, что

$$u_{21n} > 2\tau\sqrt{F(\tau)}. \quad (3.44)$$

Из (3.44), (3.24) и (3.25) получим  $u_{21n} > \frac{\omega}{\cos\omega}$ , что ввиду (3.42) дает  $u_{21n} > u_2$ . Поэтому точка  $M_{nn}$  находится вне конуса устойчивости, что влечет неустойчивость системы (3.22), (3.23) при всех  $n > n_0$ . Теорема 3.3 доказана.

### 3.7 Сравнение результатов главы 3 с известными результатами

В большинстве работ по устойчивости кольцевых нейронных сетей рассматривается задача об устойчивости сети из двух [18], трёх [45] или четырех

[34], [46] нейронов. Задача об устойчивости кольцевой системы произвольного количества нейронов рассматривали Ю. Юан и С. Кэмпбелл [35]. В [35] изучена следующая система, описывающая кольцевую нейронную сеть:

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + \alpha x_j(t - \tau_s) + \beta (x_{j-1}(t) + x_{j+1}(t - \tau)) = 0 \quad (j \bmod n), \quad (3.45)$$

В уравнении (3.45) реакция нейрона на собственный сигнал (selfconnection) разделена на две части: мгновенная реакция с интенсивностью 1 и запаздывающая на время  $\tau_s$  с интенсивностью  $\alpha$ . Реакции нейрона на сигнал правого и левого соседа имеет одинаковые запаздывания  $\tau$  и одинаковые интенсивности  $\beta$ . Если положить  $\alpha = 0$ , то система (3.45) совпадет с частным видом нашей системы (3.3) с  $a = b$ . Как показывают Предложение 3.1 и Теорема 3.1, а также рисунок 3.8, поведение таких систем несложно: при  $|\beta| < 1/2$  система устойчива независимо от запаздывания, при  $|\beta| > 1/2$  система неустойчива независимо от запаздывания. Сложность динамики системы нейронов в системе Юан-Кэмпбелл (3.45) происходит именно из-за запаздывания в реакции на собственный сигнал.

Это свидетельствует о недостаточной адекватности модели (3.45). В нашей модели источником сложности поведения моделей (3.2), (3.3) является несимметричность (когда  $a \neq b$ ) и даже антисимметричность (когда  $a = -b$ ) реакции нейрона на сигналы правого и левого соседа, что соответствует традиционному разделению сигналов на возбуждающие и тормозящие.

После публикации [45] 2006 года работы С. Кэмпбелл по нейронным сетям были посвящены только сетям с распределенным запаздыванием.

В работе [46] изучена модель кольцевой сети (3.45) с  $\tau_s = \tau$ , в которой  $n = 4$ . В этой статье указаны только области устойчивости, независимой от запаздывания, статья посвящена в основном проблемам симметрии в поведении нелинейной системы.

Насколько известно автору, кольцевые нейронные сети с неопределенно большим количеством нейронов до сих пор не рассматривались в литературе. В [8] автором диссертации совместно с научным руководителем впервые исследована устойчивость таких сетей, в частности, получены некоторые результаты главы 3.

Благодаря рассмотрению большого количества нейронов изложение решения задачи об устойчивости кольцевой сети в диссертации является достаточно прозрачным. Вот для сравнения цитата из работы [35] (2004) Ю. Юан и С. Кэмпбелл:

«Области устойчивости при нечетных  $n$  сходны с областями при  $n = 3$ , которые были исследованы в [45] , поэтому мы сосредоточимся на области устойчивости для четных  $n$ .»

Изучение устойчивости линейных конфигураций нейронов не встречается в литературе, хотя в публикациях по устойчивости кольцевых сетей такая тема вполне естественна, так как линейная конфигурация в некотором смысле является предельной для кольцевой.

## Глава 4

# Численное и качественное исследование устойчивости сетей кольцевой и линейной конфигураций с ограниченным количеством нейронов

### 4.1 Алгоритм и программа для построения границ областей устойчивости кольцевых нейронных сетей с ограниченным количеством нейронов

В этом разделе мы опишем алгоритм и программу для построения границ области устойчивости кольцевых нейронных сетей с ограниченным количеством нейронов. Программа использует фрагменты предыдущих программ «Анализ устойчивости» (раздел 2.2) и «Устойчивость нейронных сетей» (раздел 3.2).

Мы рассматриваем задачу устойчивости систем (см. формулы (3.2), (3.3) соответственно)

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n), \quad (4.1)$$

$$\dot{x}_j(t) + x_j(t) + a x_{j-1}(t - \tau) + b x_{j+1}(t - \tau) = 0 \quad (j \bmod n). \quad (4.2)$$

В дальнейшем кольцевые сети, описываемые уравнением (4.1), будем называть сетями с односторонним запаздыванием, а сети, описываемые уравнением (4.2), — сетями с двусторонним запаздыванием.



#### 4.1.1 Алгоритм нахождения границы области устойчивости

Для построения границ областей устойчивости и неустойчивости данных моделей в плоскости  $(a, b)$  применяется отдельный алгоритм. Он предназначен для построения замкнутой кривой, состоящей из равномерного массива точек, соответствующей границе области устойчивости круговых нейронных сетей с погрешностью  $\delta$ . Априорно предполагается, что границей области устойчивости является замкнутая кривая, причём область устойчивости находится внутри её.

Данный алгоритм проиллюстрирован на следующем рисунке 4.1.

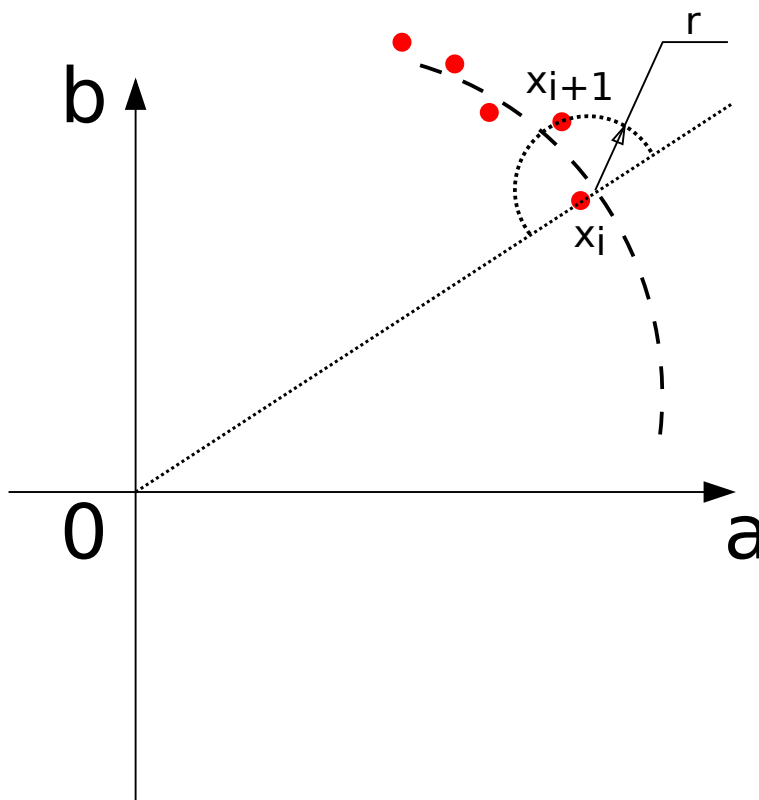


Рис. 4.1. Схема нахождения точек в программе «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей»

Вначале находим первую точку границы, которая образуется при пересечении этой границы с осью  $0a$ . Для этого сначала определяем две точки на луче  $0a$ : одну внутри области устойчивости, а другую вне её. В качестве первой точки нам подойдёт точка с координатами  $(0, 0)$ , так как она, очевидно,

является устойчивой точкой для уравнения 1.6. Вторую точку мы найдём, двигаясь по лучу  $0a$  с шагом 1 (инкрементируя параметр  $a$  на единицу) до тех пор, пока точка не окажется вне области устойчивости. Диагностирование принадлежности точек области устойчивости проводится с помощью алгоритма 4.1.2. Затем методом дихотомии уточняем её до заданной точности.

Все остальные точки находятся следующим образом:

1. Переходим в полярную систему координат с центром в только что найденной точке  $x_i$ , так что её ось совпадает с осью  $0x_i$
2. Ищем следующую точку  $x_{i+1}$  на расстоянии точки  $x_i$  заданной погрешности  $\delta$ , проводя итерацию по следующему алгоритму.

Определяем начальные параметры:

$$r = \delta, \quad \phi_0 = 0, \phi_1 = \pi.$$

Так как точка  $x_i$  является граничной, то точка  $(r, \phi_0)$  будет лежать внутри области устойчивости, а точка  $(r, \phi_\pi)$  вне её. Следующую точку найдём половинным делением данной окружности, пока не будет достигнута заданная точность.

Шаг 2 проводим до тех пор, пока кривая не замкнётся.

#### 4.1.2 Алгоритм определения точек на устойчивость

Хотя данная задача уже была решена в программе «Анализ устойчивости» 2.2, мы намеренно отказались от данного алгоритма, поскольку, решая более глобальную задачу (нахождения всех границ устойчивости по  $\tau$ ), он является затратным по времени. Время вычисления принадлежности точек области устойчивости в данном случае является критичным, так как нам нужно проверять достаточно большое число этих точек, чтобы получить

границу области устойчивости с заданной точностью. Поэтому все исследуемые точки плоскости параметров диагностируются на устойчивость непосредственно с помощью метода годографов, реализованного с помощью функции *straightStabAnalyzer* (см. Приложение В).

1. Вычисляем собственные числа  $\lambda$  и  $\mu$ , которые понадобятся для нахождения точек  $M_j$ , описанных раньше 1.31. Для каждой из этих точек нужно определить, находятся ли они внутри конуса устойчивости или вне его. Это трёхмерная задача, которую мы можем свести к двумерной сечением конуса устойчивости плоскостью, параллельной плоскости  $ab$  и находящейся на высоте третьей компоненты точки  $M_j$ . Тогда остаётся определить, находится ли эта точка внутри овала устойчивости или нет.
2. Прежде всего выполняем простую проверку на непринадлежность конусу: если третья компонента точки  $M_j$  меньше нижней точки конуса, значит исследуемая точка согласно теореме 1.4 неустойчива. Дальнейшее выполнение алгоритма прекращается.
3. Для каждой из точек  $M_j$  находим параметр  $\omega$  для конуса устойчивости, который соответствует первому пересечению овала устойчивости с осью  $a$ , который находится на уровне третьей компоненты точки  $M_j$ .
4. Для каждой из точек  $M_j$  находим точку на овале устойчивости, максимально близкую к точке  $M_j$ . Если расстояние от начала координат до точки  $M_j$  окажется больше расстояния максимально близкой точки конуса, то исследуемая пара значений  $a, b$  является неустойчивой, а алгоритм завершается.
5. Если предыдущий шаг покажет, что все точки  $M_j$  лежат внутри овала устойчивости, то исследуемая пара значений  $a, b$  является устойчивой.

#### 4.1.3 Функциональное назначение и область применения программы

Программа «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» строит области устойчивости для круговых нейронных сетей (4.1), (4.2) с заданным количеством нейронов в плоскости параметров  $a$  и  $b$  в сравнении с областью устойчивости таких же нейронных сетей, но с бесконечным числом нейронов, и сохраняет результаты в графических файлах определённого пользователем формата. Программа выполнена в высокоуровневой среде для математических вычислений MATLAB 7.11.0 (R2010b) посредством matlab АРУ для создания графического интерфейса пользователя (GUI). Исходный код программы представлен в приложении В.

Программа зарегистрирована в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО), информация о ней представлена в [52], а пользовательская версия программы доступна по электронному адресу [53].

#### 4.1.4 Использование

На рисунке 4.2 представлено главное окно программы, в котором задаются входные данные.

Прежде всего пользователю предлагается выбрать конфигурацию нейронной сети. В программе доступны два варианта кругового соединения нейронов: с малым запаздыванием взаимодействия с правыми соседями (уравнение (4.1)) и с одинаковым запаздыванием взаимодействия с правыми и левыми соседями (уравнение (4.2)). Выбирая первую или вторую радиокнопку, пользователь определяет, для какой именно модели будет проводиться анализ устойчивости. На рисунке 4.2 выбрана первая конфигурация, а на рисунке 4.3 — вторая. Ниже, на панели ввода представлено название, опи-

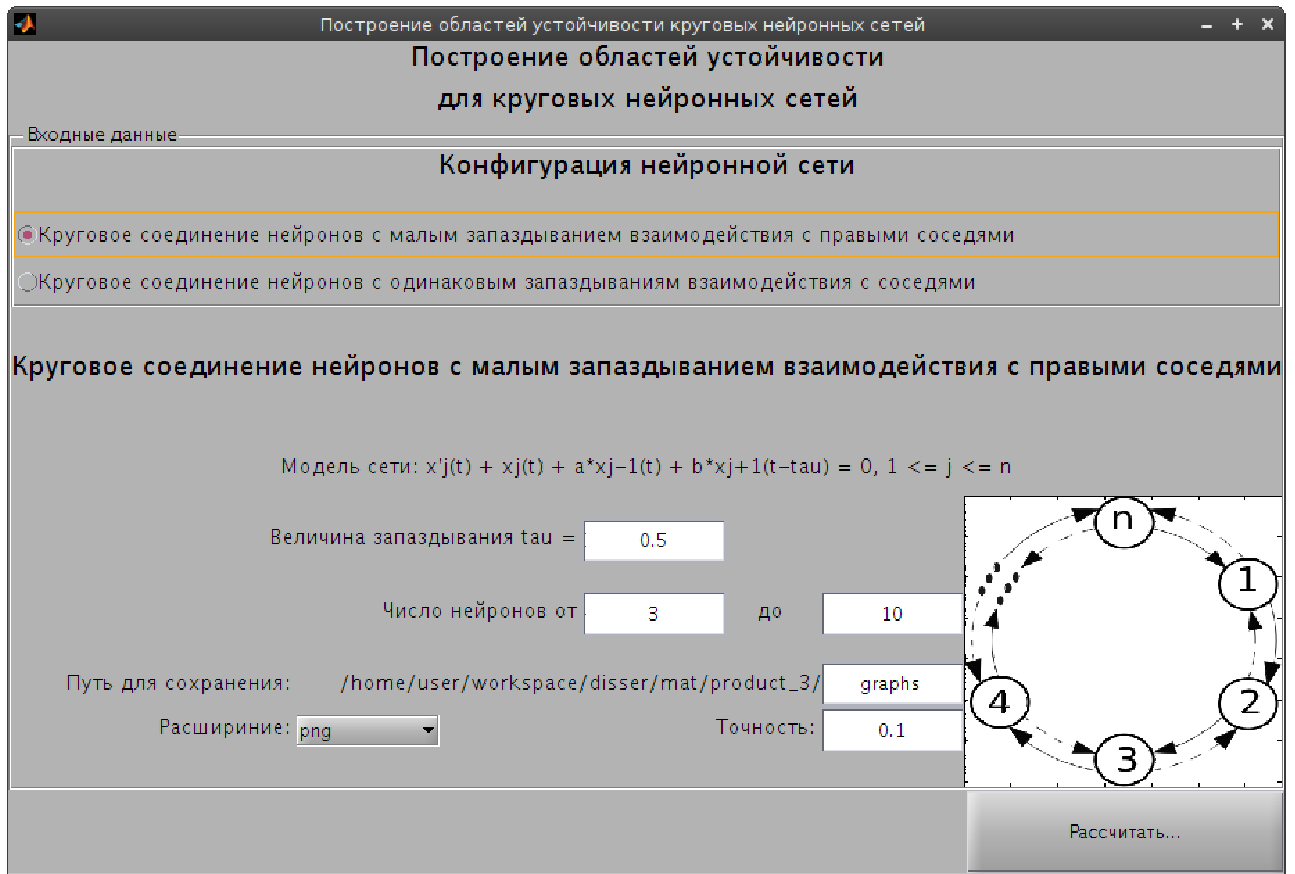


Рис. 4.2. Главное окно программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» при выборе первой конфигурации

сание и рисунок выбранной конфигурации. Пользователю необходимо ввести параметр  $\tau$ , для которого будут строиться области устойчивости, определить количество нейронов в сети (причём графики будут построены для всех  $n$ , определённых пользователем), задать директорию для сохранения, выбрать расширение, с которым будут сохраняться графики, и определить погрешность построения.

После ввода данных в обоих случаях для начала расчета необходимо нажать на кнопку «Рассчитать...». В процессе построения будут появляться вспомогательные окна, представляющие результаты расчетов. Все графики сохраняются в выбранную пользователем директорию в заданном формате и именуются определённым образом: «type\_tau\_n.ext», где type — тип соединения нейронов: «asym» для первого соединения и «sym»

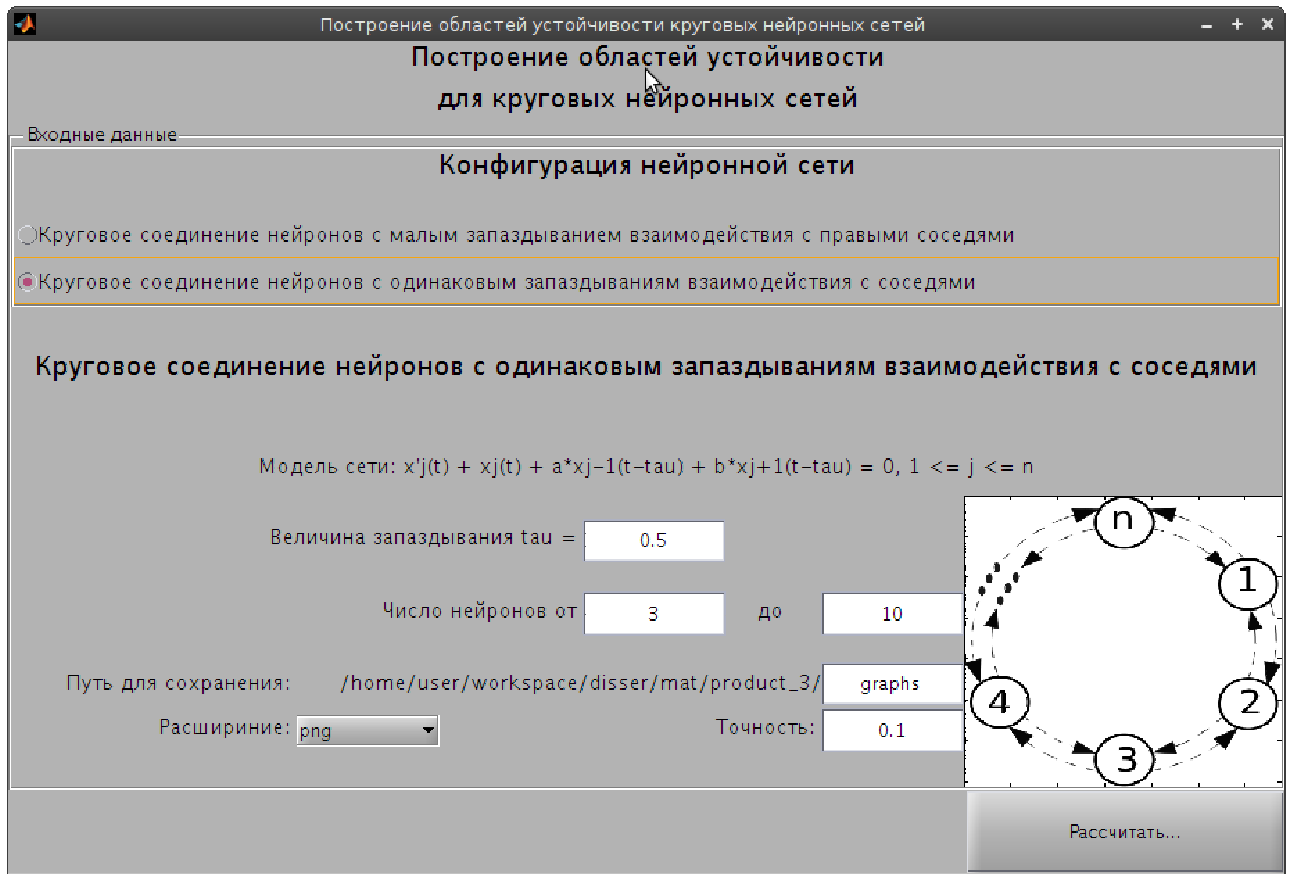


Рис. 4.3. Главное окно программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» при выборе второй конфигурации

для второго;

$\tau$  — величина запаздывания;

$n$  — количество нейронов;

ext — расширение файла.

Программа также строит область устойчивости для бесконечного числа нейронов.

После проведения расчетов пользователь может изменить входные параметры и ещё раз выполнить построение областей устойчивости. Графики будут сохраняться во вновь назначенную пользователем директорию или в ту же, если он не поменял её. Во втором случае она будут дополняться к уже существующим, а если найдутся графики с одинаковыми параметрами, то файлы будут перезаписаны.

При вводе некорректных данных программа выдает различные сообщения об ошибках. Также программа анализирует потенциальную возможность затратить большое количество времени на вычисления, когда пользователь назначает слишком высокую точность, либо большое количество графиков. В этом случае программа просит пользователя подтвердить, что он действительно хочет выполнить расчёты при заданных параметрах. Пример такого сообщения приведён на рисунке 4.4.

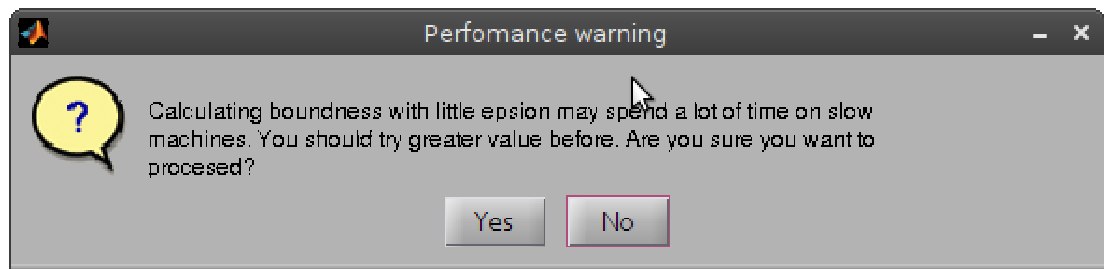


Рис. 4.4. Требование подтверждения необходимости выполнения длительных расчетов

Применение программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» позволило в плоскости параметров построить границы областей устойчивости для систем (4.1), (4.2) с ограниченным количеством нейронов. Полученные области устойчивости и неустойчивости исследуемых моделей для различных значений запаздывания и различного числа нейронов будут представлены в следующих разделах данной главы. Отметим, что исходный код описанной программы с небольшими изменениями может применяться для получения областей устойчивости не только кольцевых нейронных сетей, но и других систем, описываемых уравнением (1.6) с совместно триангулируемыми матрицами. В частности, он применялся автором для построения областей устойчивости полносвязных и звездных структур нейронных сетей (см. [54]), а также двухслойного соединения нейронов (см. [55]).

## 4.2 Границы областей устойчивости кольцевых сетей с ограниченным количеством нейронов и односторонним запаздыванием

В этом разделе мы укажем результаты поиска границ областей устойчивости для кольцевой системы нейронов с односторонним запаздыванием, описываемой уравнением (4.1). В отличие от предыдущей главы, здесь мы будем рассматривать сети с ограниченным количеством нейронов. Разделим результаты на три группы: сети с малым, средним и большим запаздываниями.

Во всех трех группах количество нейронов не меньше трех, так как для двух нейронов описание кольцевой архитектуры противоречиво.

На рисунках 4.5, 4.6, 4.7 в плоскости параметров модели (4.1) представлены границы областей устойчивости и неустойчивости соответствующей нейронной сети для  $\tau = 0.1$  (малое запаздывание),  $\tau = 0.5$  (среднее запаздывание),  $\tau = 1$  (большое запаздывание) и различного количества нейронов в сети (от 3 до 8). Результаты получены с помощью программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей», описанной в предыдущем разделе.

Сплошной линией на графиках указана граница области устойчивости такой же сети, гарантированной для любого  $n$ . Эти границы построены с помощью программы «Устойчивость нейронных сетей», описанной в главе 3 настоящей диссертации.

На представленных графиках значения параметров  $a$  и  $b$ , лежащие в области с подписью «Stability», обеспечивают устойчивость системы (4.1) при данных  $\tau$  и  $n$ . Области с подписью «Instability» соответствуют неустойчивости данной нейронной сети.



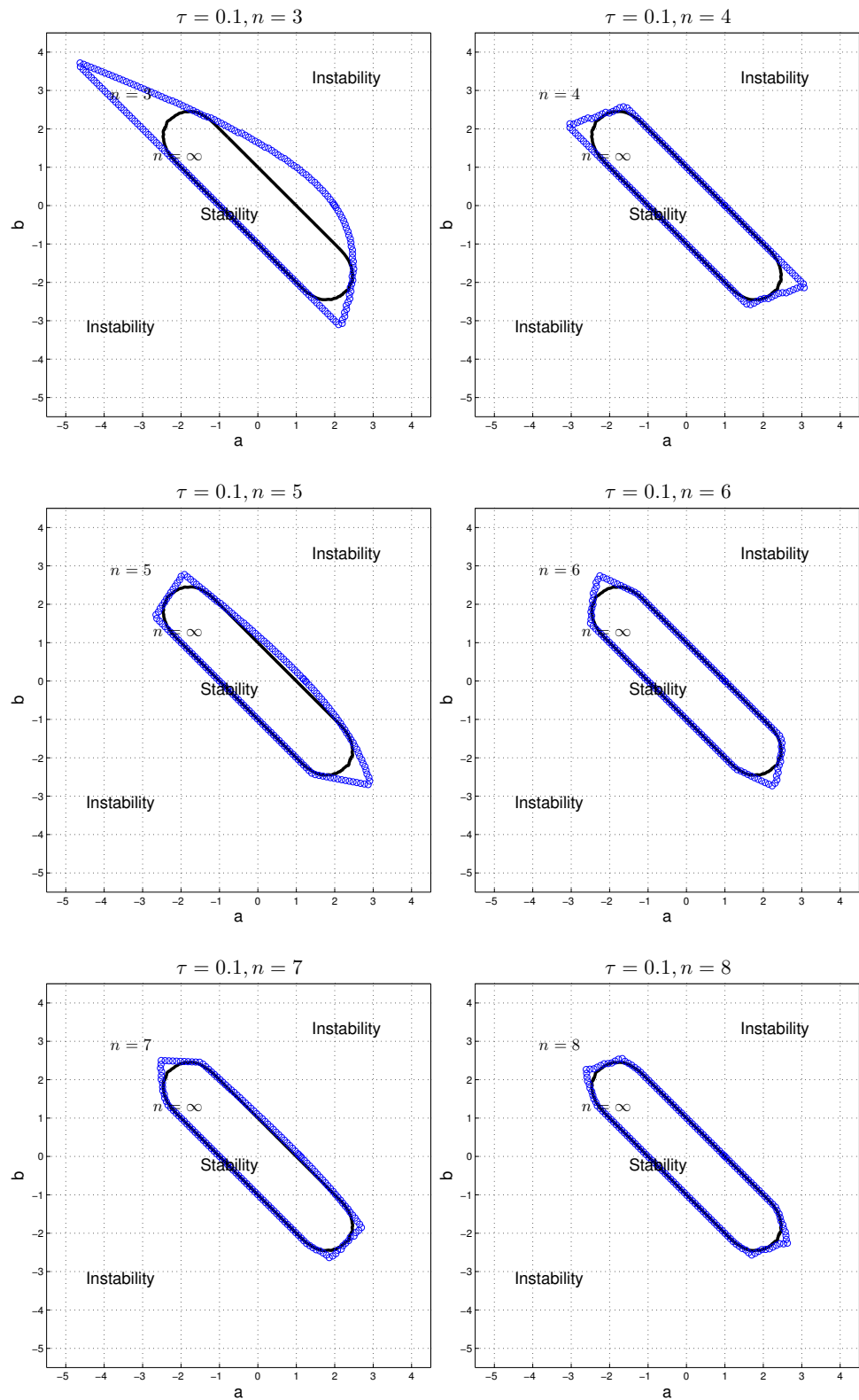


Рис. 4.5. Границы областей устойчивости для системы (4.1) для  $\tau = 0.1$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .

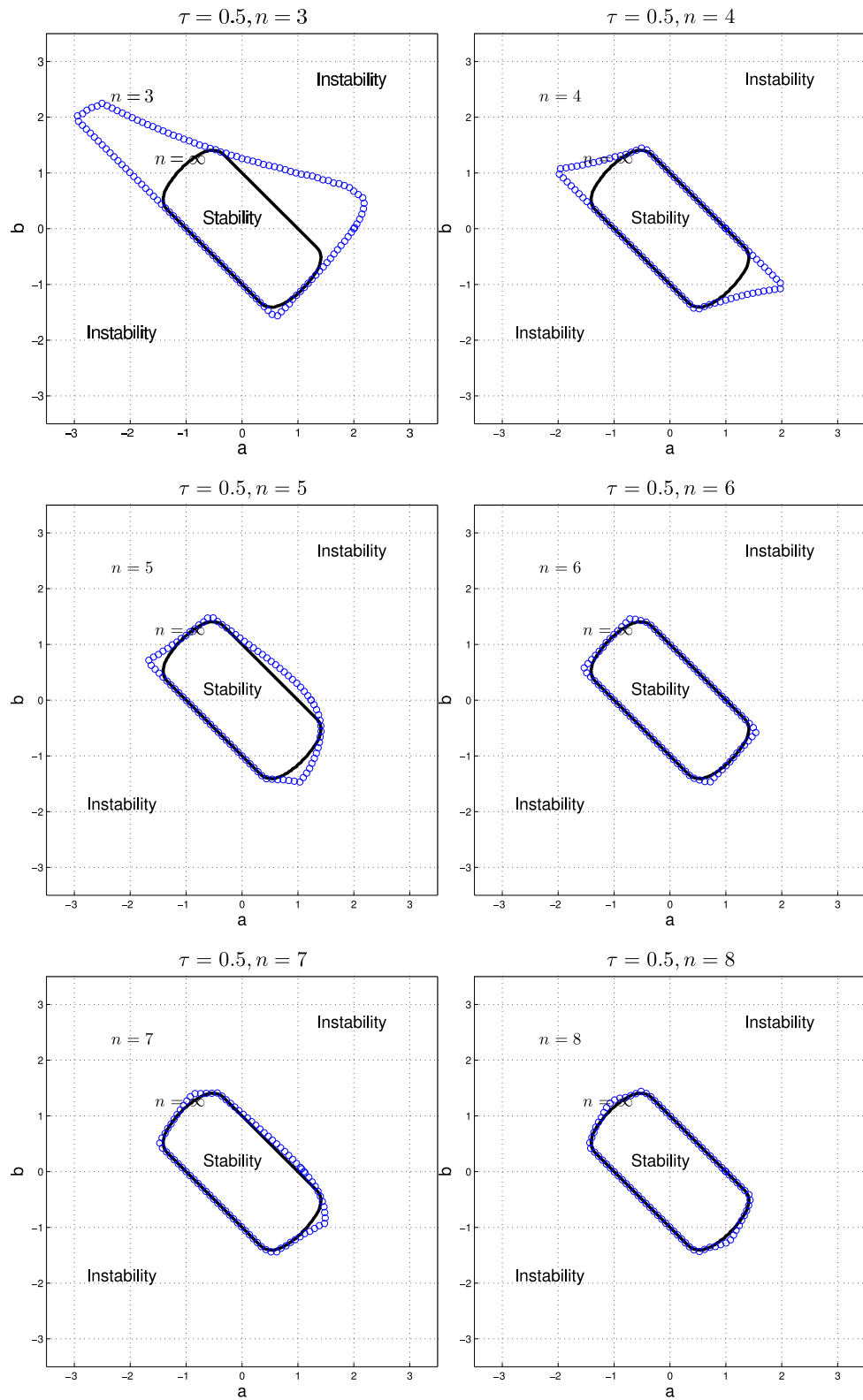


Рис. 4.6. Границы областей устойчивости для системы (4.1) для  $\tau = 0.5$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .

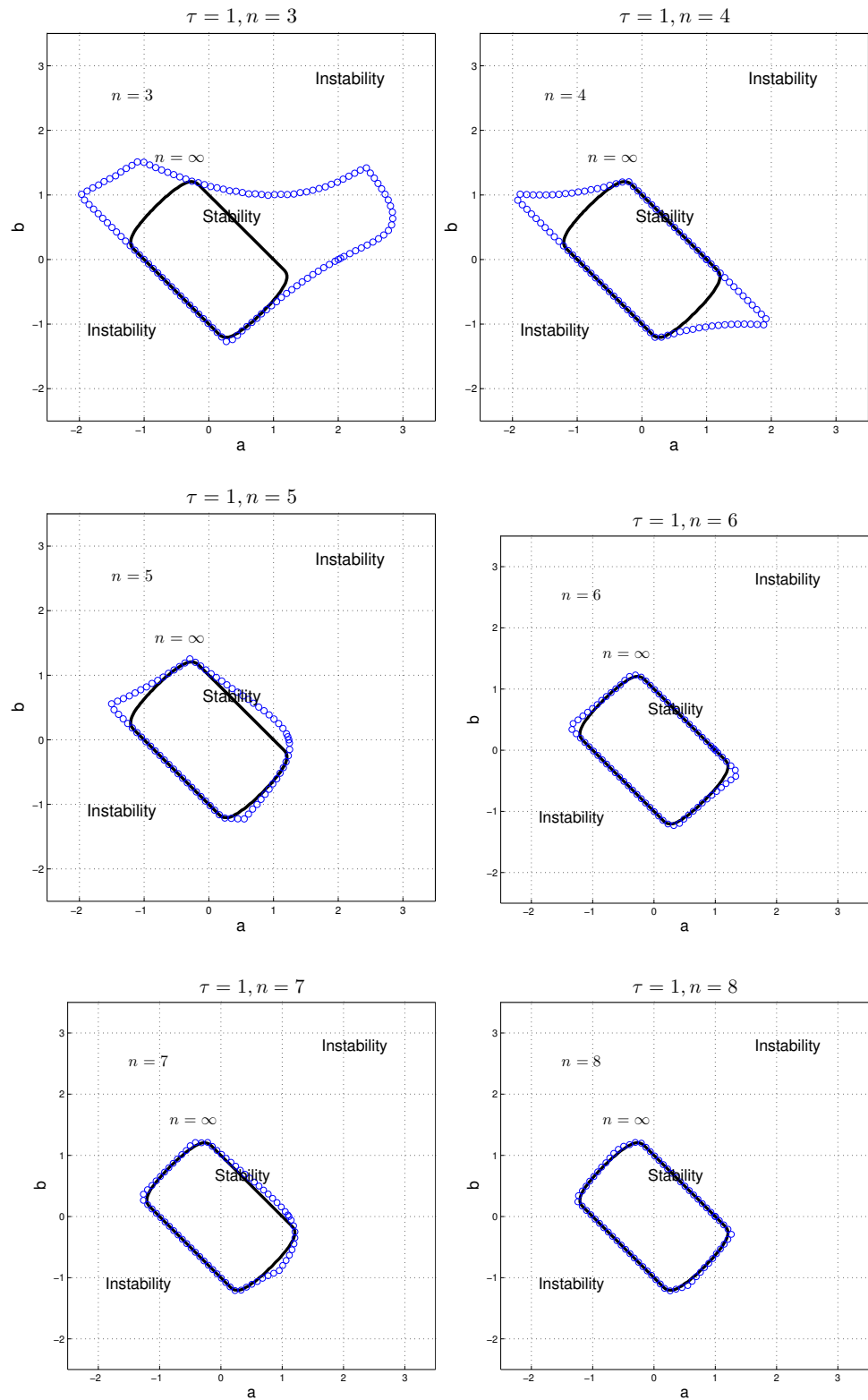


Рис. 4.7. Границы областей устойчивости для системы (4.1) для  $\tau = 1$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .

Легко заметить, что границы областей устойчивости исследуемой сети для ограниченного количества нейронов с ростом их числа сближаются с границей области устойчивости данной нейронной сети при  $n = \infty$ . При этом во всех случаях границы области устойчивости для  $n = 3$  в наибольшей степени отличаются от соответствующей границы для  $n = \infty$  и охватывают достаточно большие участки в первой и второй четвертях плоскости параметров. (эти области с ростом  $n$  заметно уменьшаются).

Также нетрудно заметить некоторое родство построенных границ для нечетных  $n$  (левый столбец графиков на всех рисунках) и четных  $n$  (правый столбец графиков). Кроме того, границы областей устойчивости для четного числа нейронов центрально-симметричны. Эти свойства говорят о непосредственном влиянии числа нейронов в исследуемой сети (при их ограниченном количестве) на её устойчивость. Однако это актуально лишь для небольших сетей, так как с увеличением  $n$  соответствующие границы быстро сближаются с границей области устойчивости для неограниченного числа нейронов.

Применение разработанного автором программного продукта позволило быстро построить серии графиков для различных значений запаздывания и различного числа нейронов и существенно помогло при анализе полученных результатов.

### **4.3 Границы областей устойчивости кольцевых сетей с ограниченным количеством нейронов и двусторонним запаздыванием**

В этом разделе мы представим результаты поиска границ областей устойчивости и неустойчивости для кольцевой системы нейронов с двусторонним запаздыванием и ограниченным количеством нейронов, описываемой уравне-

нием (4.2). Результаты получены с помощью программы, описанной в первом разделе данной главы.

Как и в предыдущем разделе, полученные области указаны кружками в трёх сериях рисунков для различных значений запаздывания (см. соответственно рисунок 4.8 для  $\tau = 0.1$ , рисунок 4.9 для  $\tau = 0.5$  и рисунок 4.10 для  $\tau = 1$ ).

Как и в случае кольцевых сетей с односторонним запаздыванием, рассмотренных в предыдущем разделе, наблюдается стремление границ областей устойчивости для ограниченного числа нейронов к границе для неограниченного числа нейронов, а также некоторое сходство полученных кривых для нечетного и четного числа нейронов в сети (левый и правый столбцы соответственно). В отличие от сетей с односторонним запаздыванием, области устойчивости для сетей с двусторонним запаздыванием и нечетным числом нейронов не выдаются в первую и вторую четверти и симметричны относительно прямой  $a = b$ .

#### **4.4 Области устойчивости при разрыве кольцевой сети нейронов**

Исследуем устойчивость нейронной сети с ограниченным числом нейронов, описываемой уравнением (4.2), при разрыве одной из связей между нейронами и переходе от кольцевой сети к линейной.

Вопрос об устойчивости нейронной сети линейной архитектуры с неограниченным числом нейронов мы рассмотрели в разделе 3.5 главы 3 настоящей диссертации. Для таких систем мы получили расширение области устойчивости в плоскости параметров модели до границ, задаваемых некоторыми гиперболами (см. рис. 3.11). В нашем случае рассмотрим кольцевую сеть с двусторонним запаздыванием (4.2) из шести нейронов и проведем численное

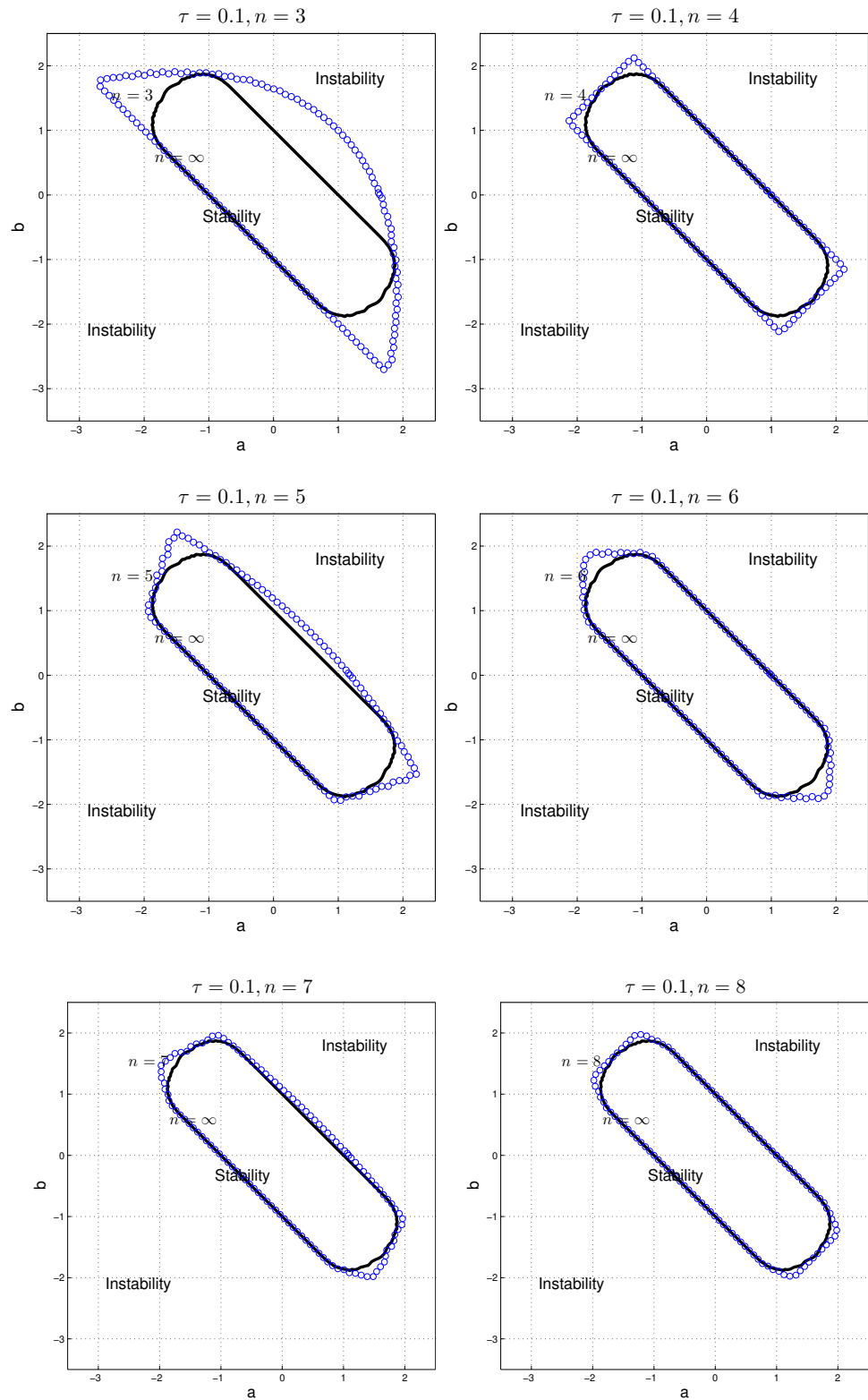


Рис. 4.8. Границы областей устойчивости для системы (4.2) для  $\tau = 0.1$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .

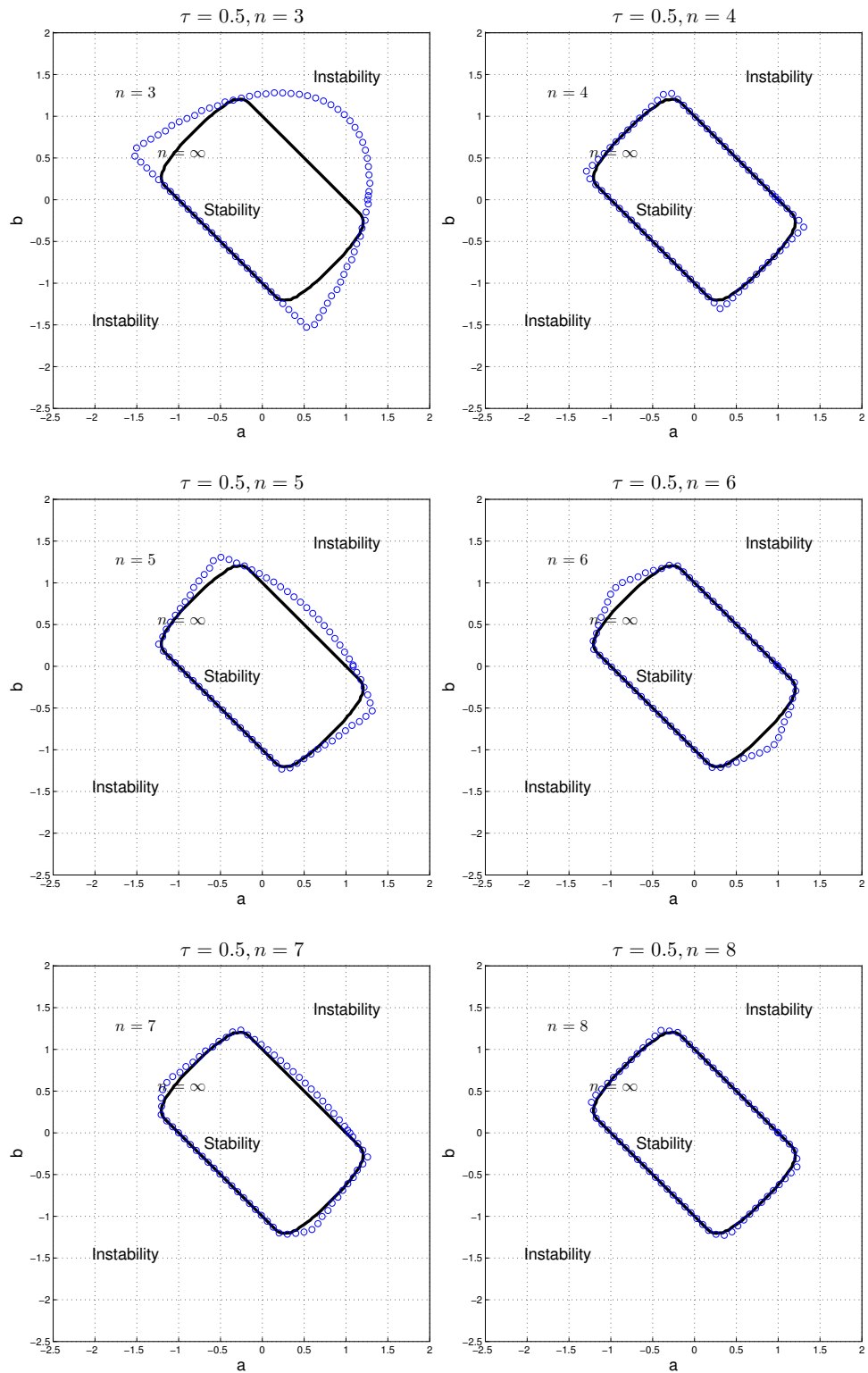


Рис. 4.9. Границы областей устойчивости для системы (4.2) для  $\tau = 0.5$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .

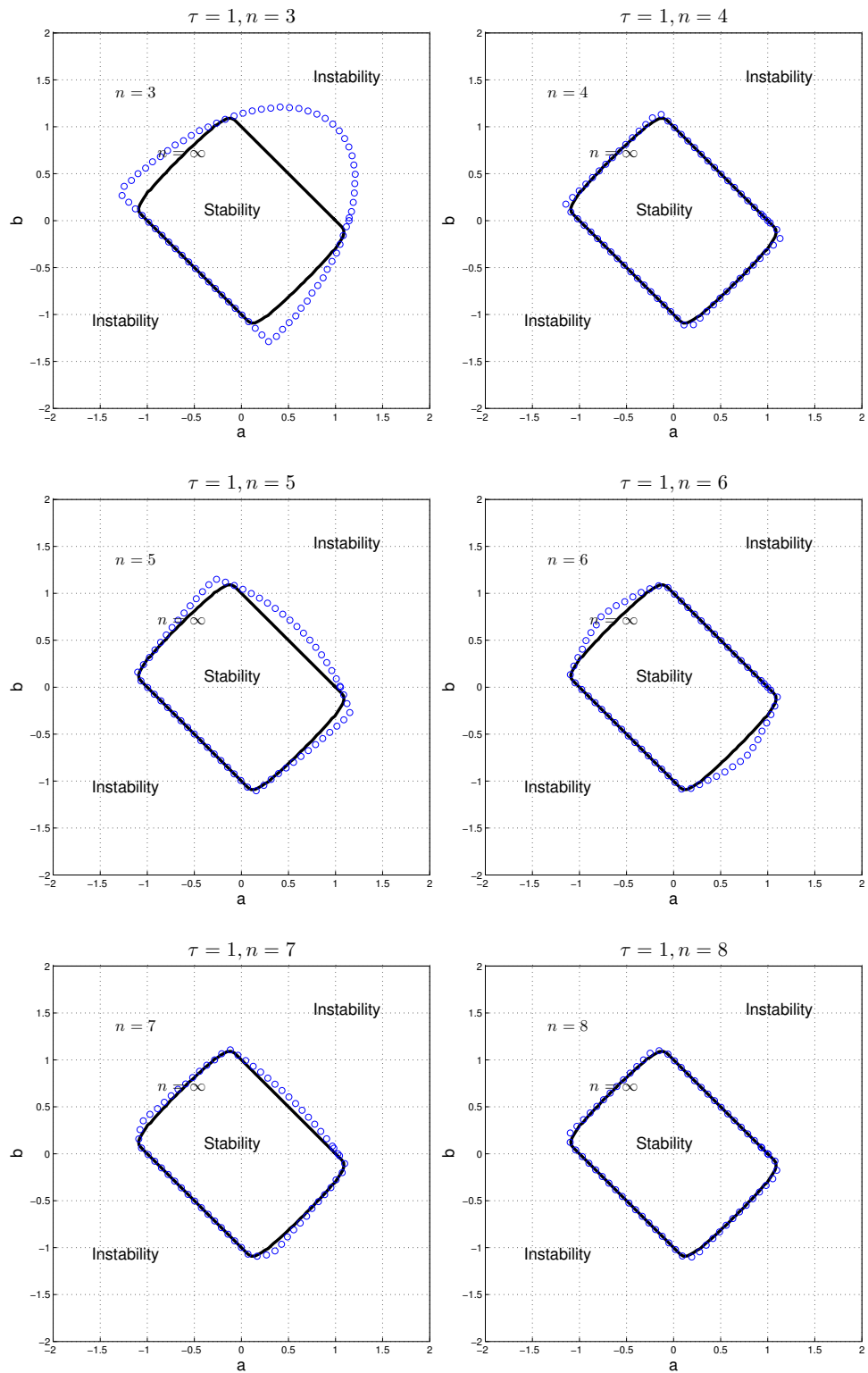


Рис. 4.10. Границы областей устойчивости для системы (4.2) для  $\tau = 1$  и значений  $n$  от 3 до 8 показаны кружками. Сплошная линия — граница области устойчивости, гарантированной для любого  $n$ .



исследование изменения областей устойчивости и неустойчивости в плоскости параметров при постепенном уменьшении связи между первым и шестым нейронами.

Пусть в кольцевой сети взаимодействие между нейронами осуществляется с запаздыванием  $\tau$  в обоих направлениях, а реакция нейрона на изменение собственного состояния мгновенна и обладает интенсивностью, равной единице. Пусть интенсивности взаимодействия между всеми нейронами, кроме первого и шестого, равны  $a$  и  $b$  (как в модели (4.2)), а интенсивности воздействия шестого нейрона на первый и первого нейрона на шестой равны соответственно  $ac$  и  $bc$ , где  $c$  – некоторый неотрицательный параметр.

Тогда взаимодействие нейронов в описанной системе задается уравнением (1.6) с матрицами

$$A = I, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & b & 0 & 0 & 0 & ac \\ a & 0 & b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 & b \\ bc & 0 & 0 & 0 & a & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

При  $c = 1$  система (1.6), (4.3) описывает кольцевую сеть с двусторонним запаздыванием (4.2), области устойчивости которой для различных  $n$  и  $\tau$  представлены в разделе 4.3 данной главы. Область устойчивости такой нейронной сети для  $n = 6$  и  $\tau = 0.1$  указана на рисунке 4.11 и напоминает вытянутый параллелограмм. При значениях параметров  $a$  и  $b$ , находящихся вне данной фигуры, наблюдается неустойчивость соответствующей системы нейронов.

С изменением  $c$  от единицы до нуля интенсивность взаимодействия между первым и шестым нейронами в системе (1.6), (4.3) постепенно ослабевает,

и при  $c = 0$  кольцо нейронов размыкается. На рисунке 4.12 построены области устойчивости и неустойчивости рассматриваемой сети при различных значениях параметра  $c$ . С уменьшением  $c$  границы областей устойчивости вытягиваются в четырех концах и при полном разрыве связи переходят в гиперболы с асимптотами  $a = 0$  и  $b = 0$  (см. последний график в серии рисунков 4.12).

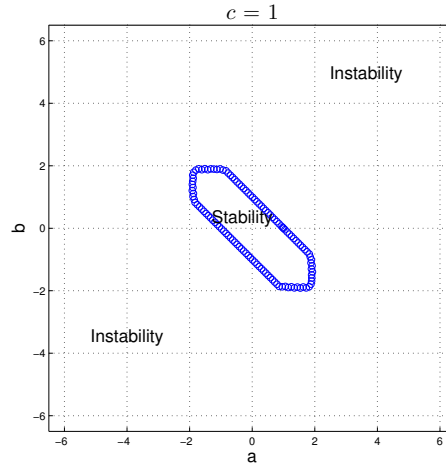


Рис. 4.11. Граница области устойчивости для системы (1.6), (4.3) для  $\tau = 0.1$  и  $c = 1$

Нетрудно заметить, что ослабление одной связи между нейронами в кольцевой сети расширяет область устойчивости всей системы, причем линейная система нейронов ( $c = 0$ ) всегда остается устойчивой при обращении в нуль одного из параметров  $a$  и  $b$ . Для всех систем (1.6), (4.3) области неустойчивости занимают достаточно большую часть плоскости  $(a, b)$ , особенно при больших по модулю значениях параметров.

Все графики получены на основе исходного кода программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей» с учетом необходимых изменений в элементах матрицы  $B$ . Отметим также, что для кольцевой системы с односторонним запаздыванием (4.1) ослабление связи в одной паре нейронов приведет к изменениям в структуре соответствующей области устойчивости, аналогичным тем, что были получены в данном разделе для системы с двусторонним запаздыванием (4.2).

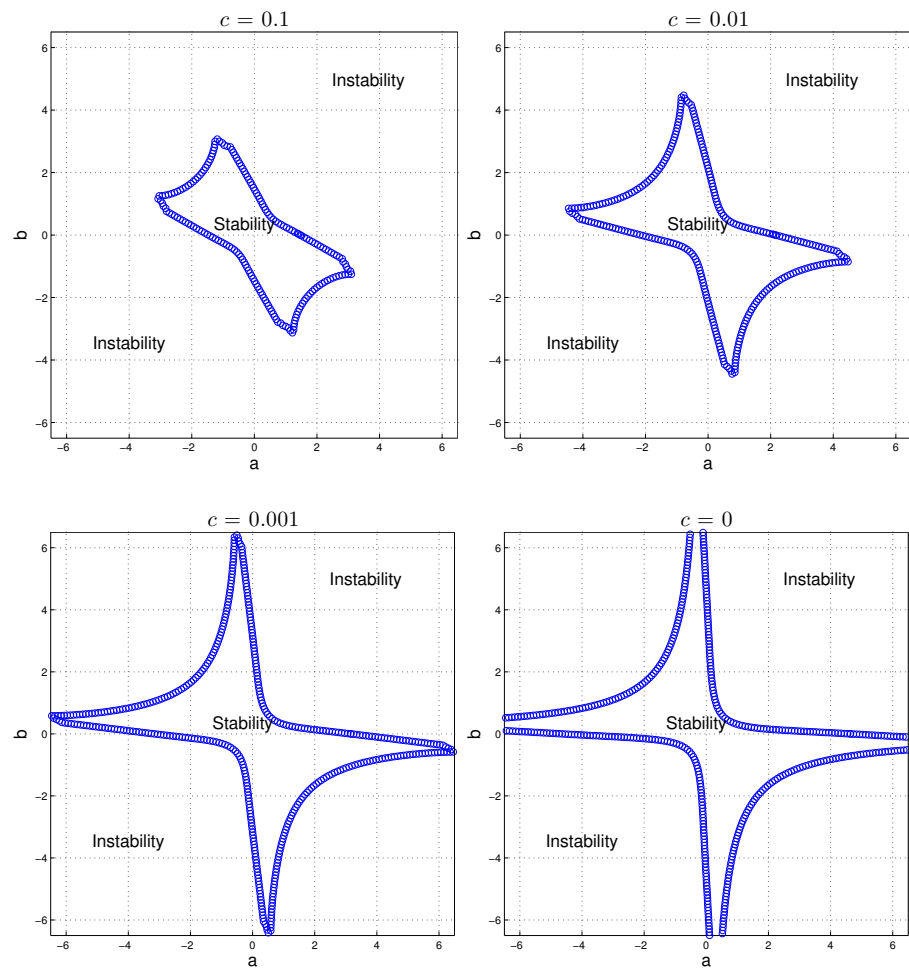


Рис. 4.12. Границы областей устойчивости для системы (1.6), (4.3) для  $\tau = 0.1$  и  $c = 0.1$ ,  $c = 0.01$ ,  $c = 0.001$ ,  $c = 0$ .

# Литература

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.
- 18.

- 19.
- 20.
- 21.
- 22.
- 23.
- 24.
- 25.
- 26.
- 27.
- 28.
- 29.
- 30.
- 31.
- 32.
- 33.
- 34.
- 35.
- 36.
- 37.

38.

39.

40.

41.

42.

43.

44.

45.

46.

47.

48.

49.

50.

51.

52.

53.

54.

55.

# Приложение А

## Исходный код программы «Анализ устойчивости»

### application.m

```
function application
    MAX_DIM = 5;
    fontsize0 = 12;
    fontsize1 = 15;
    % Строковые ресурсы.
    label_error = 'Ошибка';
    err_incorrect_cell = 'Вы ввели некорректное значение в ячейке ';
    label_graph = 'График';
    appTitle = 'Анализ устойчивости';
    header = 'Анализ устойчивости уравнения ';
    header_eq = 'x''(t) + Ax(t) + Bx(t-tau) = 0';
    inputPanelTitle = 'Входные данные';
    inputPanelDesc = 'Базовая матрица';
    resultPanelTitle = 'Результаты вычислений';
    label_dim = 'Размерность = ';
    label_method = 'Выберите способ задания матриц A и B';
    label_method1 = 'Задать матрицы A и B с помощью базовой матрицы D';
    label_method2 = 'Задать матрицы A и B с помощью собственных чисел';
    label_eig = 'Собственные числа матрицы ';
    label_A = 'A = ';
    label_B = 'B = ';
    label_D = 'D = ';
    label_rand = 'Заполнить';
    tip_rand = 'Заполняет матрицу случайными значениями';
    label_clear = 'Очистить';
    tip_clear = 'Очищает матрицу';
    label_calc = 'Рассчитать...';
    label_calc_tip = 'Определяет интервалы устойчивости системы, заданной матрицами A и B';
    label_close = 'Закрыть все графики';
    tooltip_close = 'Закрывает все ранее открытые графики';
    label_result_good = 'Уравнение устойчиво при tau, лежащем в следующем объединении интервалов:';
    label_result_bad = 'Уравнение неустойчиво при любом tau!';
    label_vector = 'Введите коэффициенты в разложении матриц A и B по степеням матрицы D';
    % Create a figure that will have a uitable, axes and checkboxes
    f = figure('Position', [50, 100, 900, 700],...
        'Name', appTitle,... % Title figure
        'NumberTitle', 'off',... % Do not show figure number
        'MenuBar', 'none'); % Hide standard menu bar menus
    uicontrol('style', 'text', ...
```

```

'string', header, ...
'fontsize', fontsize1, ...
'units', 'normalized', ...
'position', [0, .95, 1, .05]);
uicontrol('style', 'text', ...
'string', header_eq, ...
'fontsize', fontsize1, ...
'units', 'normalized', ...
'position', [0, .9, 1, .05]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Input panel.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
inputPanel = uipanel('Parent',f,'Title',inputPanelTitle,...
    'Position',[0 .3 1 .6]);
sliderPanel = uipanel('Parent',inputPanel, ...
    'bordertype', 'none', 'Position',[0 .9 1 .1]);
uicontrol(sliderPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, 'string', label_dim, ...
    'horizontalalignment', 'right',...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0, .2, 1]);
dimText = uicontrol(sliderPanel, 'style', 'text', ...
    'units', 'normalized', ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'position', [0.2, 0, .1, 1]);
scale = uipanel('parent', sliderPanel, 'bordertype', 'none', 'Position',[0.3, 0, .7, 1]);
for n=1:5
    uicontrol(scale, 'style', 'text', ...
        'string', n, ...
        'horizontalalignment', 'left', ...
        'units', 'normalized', ...
        'position', [n/5-.1, 0, .1, .5]);
end
dimSlider = uicontrol(sliderPanel, 'style', 'slider', ...
    'min', 0, 'max', 4, 'value', 4, 'sliderstep', [.25,.25], ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.3, .5, .7, .5], ...
    'callback', @dimSlider_callback);
set(dimText, 'string', get(dimSlider, 'value')+1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% input method
group = uibuttongroup('parent', inputPanel, 'Position',[0 .65 1 .25]);
uicontrol(group, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, 'string', label_method, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .3]);
set(group,'SelectionChangeFcn',@sel_callback);
uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method1,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, .3, 1,.3]);
uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method2,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, 0, 1,.3]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



```

% matrix input
matrixPanel = uipanel('Parent',inputPanel, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 .25 1 .4]);
dim = str2double(get(dimText, 'string'));
uicontrol(matrixPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', inputPanelDesc, 'horizontalalignment', 'right',...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.6, .2, .4]);
uicontrol(matrixPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_D, 'horizontalalignment', 'right',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.2, 0.6, .1, .4]);
uicontrol(matrixPanel, 'style', 'pushbutton', ...
    'string', label_clear, 'tooltipString', tip_clear,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.2, 0.4, .1, .2], ...
    'visible', 'off', 'callback', @clear_callback);
uicontrol(matrixPanel, 'style', 'pushbutton', ...
    'string', label_rand, 'tooltipString', tip_rand,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.2, 0.2, .1, .2], ...
    'visible', 'off', 'callback', @random_callback);
dim = MAX_DIM;
matrixD = createTable(dim, dim);
    set(matrixD.root, 'Parent', matrixPanel);
    set(matrixD.root, 'Position',[.3 0 .7 1]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Vector Panel
vectorPanel = uipanel('Parent',inputPanel, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 1 .25]);
uicontrol(vectorPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_vector, 'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .3]);
uicontrol(vectorPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_A, 'horizontalalignment', 'right',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.1 .3 .1 .3]);
vectorA = createVector(dim);
    set(vectorA.root, 'Parent', vectorPanel);
    set(vectorA.root, 'Position',[0.2 .3 .8 .3]);
uicontrol(vectorPanel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_B, 'horizontalalignment', 'right',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.1 0 .1 .3]);
vectorB = createVector(dim);
    set(vectorB.root, 'Parent', vectorPanel);
    set(vectorB.root, 'Position',[0.2 0 .8 .3]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Eig Panel
eigPanel = uipanel('Parent',inputPanel, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[1 0 1 .65]);
eigInput1 = createEigInput('A', 'lambda') ;
set (eigInput1.root, 'parent', eigPanel) ;
set (eigInput1.root, 'position', [0, 0, .5, 1]) ;
eigInput2 = createEigInput('B', 'mu') ;
set (eigInput2.root, 'parent', eigPanel) ;

```

```

set (eigInput2.root, 'position', [0.5, 0, .5, 1]) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Result panel.

resultPanel = uipanel('Parent',f,'Title',resultPanelTitle,...
    'Position',[0 0 1 .3]);

resultChildPanel = uipanel('Parent',resultPanel,'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0.2 .7 .8]);

resultLabels = zeros (1, MAX_DIM) ;
for n=1:MAX_DIM
    resultLabels(n) = uicontrol(resultChildPanel, 'style', 'text', ...
        'fontsize', fontsize1, 'horizontalalignment', 'left',...
        'units', 'normalized', 'position', [0, 1-.2*n, 1, .2]);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
resultMainPanel = uipanel('Parent',resultPanel,'bordertype', 'none',...
    'Position',[0.7 0.2 .3 .8]);

result_label = uicontrol(resultMainPanel, 'style', 'text', ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, .5, 1, .5]);

intervals_label = uicontrol(resultMainPanel, 'style', 'text', ...
    'units', 'normalized', ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'position', [0, 0, 1, .5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
bottomPanel = uipanel('Parent',resultPanel,'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 1 .2]);

close_btn = uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
    'string', label_close, 'tooltipString', tooltip_close, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.8, 0, .2, 1], ...
    'enable', 'off', 'callback', @close_callback);

uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', 'string', label_calc, ...
    'tooltipString', label_calc_tip,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.6, 0, .2, 1], ...
    'callback', @calc_callback);

uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
    'string', label_rand, 'tooltipString', tip_rand,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.4, 0, .2, 1], ...
    'callback', @random_callback);

uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
    'string', label_clear, 'tooltipString', tip_clear,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.2, 0, .2, 1], ...
    'callback', @clear_callback);

%----- Handlers -----%
function sel_callback(~,~)
    pos = get (matrixPanel, 'position');
    if pos(1) == 0
        % hide panels
        set (matrixPanel, 'position', [1 .25 1 .4]) ;
        set (vectorPanel, 'position', [1 0 1 .25]) ;

```

```

        % show panel
        set (eigPanel, 'position', [0 0 1 .65]) ;
    else
        % remove panel
        set (eigPanel, 'position', [1 0 1 .65]) ;
        % show panels
        set (matrixPanel, 'position', [0 .25 1 .4]) ;
        set (vectorPanel, 'position', [0 0 1 .25]) ;
    end
end

app_x = 100;
app_y = 200;
graph_count = 0;
function calc_callback(~, ~)
    % getting eig values.
    dim = getDim () ;
    eigA = zeros (1, dim) ;
    eigB = zeros (1, dim) ;
    % Choosing the input method
    pos = get (matrixPanel, 'position');
    if pos(1) == 0
        D = getValues(matrixD.children, dim);
        eigD = eig(D) ;
        rowA = getVectorValues(vectorA.children, dim) ;
        rowB = getVectorValues(vectorB.children, dim) ;
        for j=1:length(eigD)
            e = [1 eigD(j) eigD(j)^2 eigD(j)^3 eigD(j)^4 eigD(j)^4]';
            eigA (j) = rowA*e(1:dim+1) ;
            eigB (j) = rowB*e(1:dim+1) ;
        end
    else
        eigA = getEigValues(eigInput1);
        eigB = getEigValues(eigInput2);
    end
    if isempty(eigA) || isempty(eigB)
        return;
    end
    app_x = app_x + 80;
    app_y = app_y - 80;
    graph_count = graph_count + 1;
    figure('Position', [app_x app_y, 600, 500],...
        'Name', [label_graph ' ' num2str(graph_count)],... % Title figure
        'NumberTitle', 'off');
    [intervals, intervalsCell]= pointsPlotter(eigA, eigB);
    set (close_btn, 'enable', 'on') ;
    dim = str2double(get(dimText, 'string'));
    for n=1:dim
        set(resultLabels(n), 'string', buildResult(intervalsCell{n}));
    end
end

```

```

    for n=dim+1:MAX_DIM
        set(resultLabels(n), 'string', '');
    end
    % Set main result label.
    if isempty(intervals)
        set(result_label, 'string', label_result_bad);
    else
        set(result_label, 'string', label_result_good);
    end
    resultString = buildResult(intervals);
    set(intervals_label, 'string', resultString);
end
% Closes all graph windows.
function close_callback(~, ~)
    for n=1:graph_count
        try
            close([label_graph ' ' num2str(n)]);
        catch me
            display(me);
        end
    end
    app_x = 100;
    app_y = 200;
    graph_count = 0;
    set(close_btn, 'enable', 'off');
end
% DimSlider was changed.
function dimSlider_callback(~, ~)
    val = int32(get(dimSlider, 'value'))+1;
    if str2double(get(dimText, 'string')) == val
        return;
    end
    set(dimText, 'string', val);
    setDim(matrixD.children, val);
    setVectorDim(vectorA.children, vectorA.children1, val);
    setVectorDim(vectorB.children, vectorB.children1, val);
    setEigInputDim(eigInput1, val);
    setEigInputDim(eigInput2, val);
end
% Regenerate matrix.
function random_callback(~, ~)
    setValues(matrixD.children, rand (getDim()*2-1);
    generateRowValues(vectorA.children, MAX_DIM+1);
    generateRowValues(vectorB.children, MAX_DIM+1);
    generateRowValues(eigInput1.children, MAX_DIM);
    generateRowValues(eigInput1.children1, MAX_DIM);
    generateRowValues(eigInput2.children, MAX_DIM);
    generateRowValues(eigInput2.children1, MAX_DIM);
end

```

```

% Clear matrix.
function clear_callback(~, ~)
    %if obj == clearAButton
    clearMatrix(matrixD.children);
    clearRowValues(vectorA.children, MAX_DIM+1) ;
    clearRowValues(vectorB.children, MAX_DIM+1) ;
    clearRowValues(eigInput1.children, MAX_DIM) ;
    clearRowValues(eigInput1.children1, MAX_DIM) ;
    clearRowValues(eigInput2.children, MAX_DIM) ;
    clearRowValues(eigInput2.children1, MAX_DIM) ;
end

%----- Functions -----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function d = getDim ()
    d = str2double(get(dimText, 'string'));
end
function value = getRandomValAsString ()
    value = num2str(rand (1)*2-1,4);
end
% Build result string.
function [resultString] = buildResult(intervals)
    resultString = '';
    for k = 1:2:length(intervals)
        from = num2str(intervals(k));
        to = num2str(intervals(k+1));
        resultString = [resultString ' ( ' from ' , ' to ' ) U'];
    end
    resultString = resultString(1:end-1);
    if isempty(resultString)
        resultString = 'Empty set';
    end
end
function generateRowValues(children, dim)
    for n=1:dim
        set(children(n), 'string', getRandomValAsString());
    end
end
function clearRowValues(children, dim)
    for n=1:dim
        set(children(n), 'string', '');
    end
end

%----- Eig input -----%
function eigInput = createEigInput (matrixName, eigName)
    root = uipanel();
    uicontrol(root, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1,...
        'string', [label_eig matrixName],...
        'units', 'normalized', 'position', [0, .7, 1,.2]);
    panel = uipanel('parent', root, 'bordertype', 'none',...

```

```

        'position', [0, 0, 1, .7]);
childrenLabels = zeros (1, MAX_DIM) ;
children = zeros (1, MAX_DIM) ;
childrenLabels1 = zeros (1, MAX_DIM) ;
children1 = zeros (1, MAX_DIM) ;
childrenLabels2 = zeros (1, MAX_DIM) ;
for n=1:MAX_DIM
    strnum = num2str (n) ;
    childrenLabels(n) = uicontrol(panel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1,...
        'horizontalAlignment', 'right', 'string', [eigName strnum ' = '],...
        'units', 'normalized', 'position', [0, 1-.2*n, .3, .2]);
    children(n) = uicontrol(panel, 'style', 'edit', ...
        'string', num2str (rand (1)*2-1, 4), 'backgroundcolor', 'w',...
        'units', 'normalized', 'position', [.3, 1-.2*n, .25, .2]);
    childrenLabels1(n) = uicontrol(panel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1,...
        'horizontalAlignment', 'center', 'string', ' + ',...
        'units', 'normalized', 'position', [0.55, 1-.2*n, .1, .2]);
    children1(n) = uicontrol(panel, 'style', 'edit', ...
        'string', num2str (rand (1)*2-1, 4), 'backgroundcolor', 'w',...
        'units', 'normalized', 'position', [.65, 1-.2*n, .25, .2]);
    childrenLabels2(n) = uicontrol(panel, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1,...
        'horizontalAlignment', 'left', 'string', '*i',...
        'units', 'normalized', 'position', [0.9, 1-.2*n, .1, .2]);
end
eigInput.root = root;
eigInput.children = children;
eigInput.children1 = children1;
eigInput.childrenLabels = childrenLabels;
eigInput.childrenLabels1 = childrenLabels1;
eigInput.childrenLabels2 = childrenLabels2;
end
function setEigInputDim(eigInput, dim)
    for n = 1:dim
        set(eigInput.children(n), 'visible', 'on');
        set(eigInput.children1(n), 'visible', 'on');
        set(eigInput.childrenLabels(n), 'visible', 'on');
        set(eigInput.childrenLabels1(n), 'visible', 'on');
        set(eigInput.childrenLabels2(n), 'visible', 'on');
    end
    for n = dim+1:MAX_DIM
        set(eigInput.children(n), 'visible', 'off');
        set(eigInput.children1(n), 'visible', 'off');
        set(eigInput.childrenLabels(n), 'visible', 'off');
        set(eigInput.childrenLabels1(n), 'visible', 'off');
        set(eigInput.childrenLabels2(n), 'visible', 'off');
    end
end
function vector = getEigValues(eigInput)
    vector = zeros(1, getDim());

```

```

for j=1:getDim()
    valRe = get(eigInput.children(j), 'string');
    valIm = get(eigInput.children1(j), 'string');
    parseValueRe = str2double(valRe);
    parseValueIm = str2double(valIm);
    if length(parseValueRe) ~= 1 || length(parseValueIm) ~= 1
        str = [err_incorrect_cell '(' num2str(j) ')'].';
        errordlg(str, label_error, 'on');
        vector = [];
        return;
    end
    vector(j)=parseValueRe + parseValueIm*1i;
end
end

%----- Vector input -----%
function vector = createVector(dim)
    dim = dim+1;
    root = uipanel('borderType', 'none');
    children = zeros(1, dim); % row
    children1 = zeros(1, dim); % row
    strings = {'E + ', 'D + ', 'D^2+', 'D^3+', 'D^4+', 'D^5'};
    for j=1:dim
        children(j) = uicontrol(root, 'style', 'edit', ...
            'string', num2str (rand (1)*2-1, 4), 'backgroundcolor', 'w',...
            'units', 'normalized', 'position', [(j-1)/dim, 0, 1/dim/2, 1]);
        children1(j) = uicontrol(root, 'style', 'text', 'string', strings (j),...
            'fontsize', fontsize1, 'units', 'normalized', ...
            'position', [(j-1)/dim+1/dim/2, 0, 1/dim/2, 1]);
    end
    vector.root = root;
    vector.children = children;
    vector.children1 = children1;
end

function setVectorDim(children, children1, dim)
    for j= 1:MAX_DIM+1
        if j>dim+1
            set(children(j), 'visible', 'off');
            set(children1(j), 'visible', 'off');
        else
            set(children(j), 'visible', 'on');
            set(children1(j), 'visible', 'on');
        end
    end
end

function vector = getVectorValues(children, dim)
    vector = zeros(1, dim+1);
    for j=1:dim+1
        val = get(children(j), 'string');
        parseValue = str2double(val);
    end
end

```

```

        if length(parseValue) ~= 1
            str = [err_incorrect_cell '(' num2str(j) ')'.'];
            errordlg(str, label_error, 'on');
            vector = [];
            return;
        end
        vector(j)=str2double(val);
    end
end
end
%----- Matrix input -----%
function matrix = createTable(rows, cols)
    root = uipanel('bordertype', 'none');
    children = zeros(rows, cols);
    for i=1:rows
        for j=1:cols
            children(i,j) = uicontrol(root, 'style', 'edit', ...
                'string', num2str(rand (1)*2-1,4), 'backgroundcolor', 'w',...
                'units', 'normalized', 'position', [(i-1)/rows, 1-j/cols, 1/cols, 1/rows]);
        end
    end
    matrix.root = root;
    matrix.children = children';
end
function [matrix] = getValues(children, dim)
    matrix = zeros(dim, dim);
    for i=1:dim
        for j=1:dim
            val = get(children(i,j), 'string');
            parseValue = str2double(val);
            if length(parseValue) ~= 1
                str = [err_incorrect_cell '(' num2str(i) ', ' num2str(j) ')'.'];
                errordlg(str, label_error, 'on');
                matrix = [];
                return;
            end
            matrix(i,j)=str2double(val);
        end
    end
end
function setValues(children, matrix)
    for i=1:length(matrix)
        for j=1:length(matrix)
            if i <= length(children) && j <= length(children)
                set(children(i,j), 'string', num2str (matrix(i,j), 4));
            end
        end
    end
end
function clearMatrix(children)

```



```

        for i=1:length(children)
            for j=1:length(children)
                set(children(i,j), 'string', '');
            end
        end
    end
end
function setDim(children, dim)
    for i = 1:MAX_DIM
        for j= 1:MAX_DIM
            if i>dim || j>dim
                set(children(i,j), 'visible', 'off');
            else
                set(children(i,j), 'visible', 'on');
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

## pointsPlotter.m

```

function [result, intervalsCell] = pointsPlotter(lambda, mu, maxdistanse, resolution)
    addPath(' ../common');
    % Построение конуса устойчивости.
    cone();
    % Построение точек.
    all = [0 Inf];
    intervalsCell = cell(size (lambda) ) ;
    for j=1:length(lambda)
        la = lambda(j);
        m = mu(j);
        % Calculation stability intervals.
        intervals = getintervals(lambda(j), mu(j));
        intervalsCell{j} = intervals;
        all = intersection(all, intervals);
    end
    if exist('maxdistanse', 'var') == false
        maxdistanse = 7;
    end
    if exist('resolution', 'var') == false
        resolution =0.5;
    end
    dist_real = distance(m, la, 0, 1) ;
    max_tau = maxdistanse/dist_real;
    dist_real = distance(m, la, max_tau, max_tau-max_tau/10) ;
    quantity = dist_real/resolution*10;
    tau = 0.001 : max_tau/quantity : max_tau;
    for jj=1:length(tau)
        x = tau*abs(m).*cos(arg(m) + tau*imag(la));
        y = tau*abs(m).*sin(arg(m) + tau*imag(la));
    end

```

```
z = tau*real (la);
if isInside(intervals, tau(jj))
    color = 'b';
else
    color = 'r';
end
text(x(jj), y(jj), z(jj), '*', 'color', color, 'fontsize', 20);
end
text(x(jj), y(jj), z(jj), num2str(j), 'color', color, 'fontsize', 20);
end
result = all;
end

function [x,y,z] = point(m, la, tau)
    x = tau*abs(m).*cos(arg(m) + tau*imag(la));
    y = tau*abs(m).*sin(arg(m) + tau*imag(la));
    z = tau*real (la);
end

function [distance] = distance(m, la, tau0, tau1)
    [x0, y0, z0] = point(m, la, tau0) ;
    [x1, y1, z1] = point(m, la, tau1) ;
    distance = sqrt ((x1-x0)^2 + (y1-y0)^2 + (z1-z0)^2) ;
end
```

## Приложение Б

# Исходный код программы «Устойчивость нейронных сетей»

### application2.m

```
function application2
    fontsize0 = 12;
    fontsize1 = 15;
    figure_width = 600;
    figure_height = 500;
    screen_size = get(0,'ScreenSize');
    screen_width = screen_size(1,3);
    screen_height = screen_size(1,4);
    figure_x = 0;
    figure_y = 0;
    graph_count = 0;
    resetFigureVars();
    image1 = imread('../common/circles_right.png');
    image2 = imread('../common/circles.png');
    label_graph = 'График';
    appTitle = 'Устойчивость нейронных сетей';
    header = 'Анализ устойчивости нейронных сетей';
    header_eq = 'с большим количеством нейронов';
    inputPanelTitle = 'Входные данные';
    resultPanelTitle = 'Результаты вычислений';
    label_method = 'Конфигурация нейронной сети';
    label_method1 = 'Круговое соединение нейронов с малым запаздыванием взаимодействия с правыми соседями';
    label_method2 = 'Круговое соединение нейронов с одинаковым запаздыванием взаимодействия с соседями';
    label_model1 = 'Модель сети:  $x''_j(t) + x_j(t) + a*x_{j-1}(t) + b*x_{j+1}(t-\tau) = 0, 1 \leq j \leq n$ ';
    label_model2 = 'Модель сети:  $x''_j(t) + x_j(t) + a*x_{j-1}(t-\tau) + b*x_{j+1}(t-\tau) = 0, 1 \leq j \leq n$ ';
    label_intens = 'Интенсивность взаимодействия нейрона с';
    label_right = 'правым соседним нейроном a =';
    label_left = 'левым соседним нейроном b =';
    label_set_tau = 'Величина запаздывания tau =';
    label_rand = 'Заполнить';
    tip_rand = 'Заполняет входные данные случайными значениями';
    label_clear = 'Очистить';
    tip_clear = 'Очищает входные данные';
    label_calc = 'Рассчитать...';
    label_calc_tip = 'Определяет интервалы устойчивости системы, заданной матрицами A и B';
    label_close = 'Закрыть все графики';
    tooltip_close = 'Закрывает все ранее открытые графики';
    label_result_good = 'Уравнение устойчиво при tau, находящемся в интервале:';
    label_result_bad = 'Уравнение неустойчиво.';
```

```

% Create a figure that will have a uitable, axes and checkboxes
f = figure('Position', [50, 100, 900, 700],...
    'Name', appTitle,... % Title figure
    'NumberTitle', 'off',... % Do not show figure number
    'MenuBar', 'none'); % Hide standard menu bar menus
uicontrol('style', 'text', ...
    'string', header, ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'units', 'normalized', ...
    'position', [0, .95, 1, .05]);
uicontrol('style', 'text', ...
    'string', header_eq, ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'units', 'normalized', ...
    'position', [0, .9, 1, .05]);
rootPanel = uipanel('Parent',f, 'bordertype', 'none', 'Position',[0 0 1 1]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Input panel.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
inputPanel = uipanel('Parent',rootPanel,'Title',inputPanelTitle,...
    'Position',[0 .3 1 .6]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% input method
group = uibuttongroup('parent', inputPanel, 'Position',[0 .75 1 .25]);
uicontrol(group, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, 'string', label_method, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .3]);
set(group,'SelectionChangeFcn',@sel_callback);
rb1 = uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method1,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, .3, 1,.3]);
rb2 = uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method2,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, 0, 1,.3]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% first method
inputPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 1 .65]);
method_text = uicontrol(inputPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_method1, 'units', 'normalized', 'position', [0, 0.85, 1, .2]);
model_text = uicontrol(inputPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_model1, 'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .1]);
leftPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel1, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 .6 .7]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, 'string', label_intens, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .2]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, 'string', label_right, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.5, .6, .15]);
input_a = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', num2str(rand(1)*2-1, 4), 'backgroundcolor', 'w',...

```

```

        'units', 'normalized', 'position', [0.6 .5 .4 .15]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, 'string', label_left, ...
        'units', 'normalized', 'position', [0, 0.3, .6, .15]);
input_b = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
        'string', num2str(rand(1)*2-1, 4), 'backgroundcolor', 'w',...
        'units', 'normalized', 'position', [0.6 .3 .4 .15]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, 'string', label_set_tau, ...
        'units', 'normalized', 'position', [0, 0, .6, .15]);
input_tau = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
        'string', num2str(rand(1), 4), 'backgroundcolor', 'w',...
        'units', 'normalized', 'position', [0.6 .05 .4 .15]);
rightPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel1, 'bordertype', 'none',...
        'Position',[.75 0 .25 .7]);
ax = axes('parent', rightPanel1, 'position', [0 0 1 1]);
image( image1, 'parent', ax);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Result panel.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
resultPanel = uipanel('Parent',rootPanel,'Title',resultPanelTitle,...
        'Position',[0 0 1 .3]);
result_text = uicontrol(resultPanel, 'style', 'text', ...
        'fontsize', fontsize1, ...
        'units', 'normalized', 'position', [0, .5, .7, .5]);
interval_text = uicontrol(resultPanel, 'style', 'text', ...
        'fontsize', fontsize1, ...
        'units', 'normalized', 'position', [0.7, .5, .3, .5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bottom panel.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
bottomPanel = uipanel('Parent',resultPanel,'bordertype', 'none',...
        'Position',[0 0 1 .2]);
close_btn = uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
        'string', label_close, 'tooltipString', tooltip_close, ...
        'units', 'normalized', 'position', [0.8, 0, .2, 1], ...
        'enable', 'off', 'callback', @close_callback);
uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', 'string', label_calc, ...
        'tooltipString', label_calc_tip,...
        'units', 'normalized', 'position', [0.6, 0, .2, 1], ...
        'callback', @calc_callback);
uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
        'string', label_rand, 'tooltipString', tip_rand,...
        'units', 'normalized', 'position', [0.4, 0, .2, 1], ...
        'callback', @random_callback);
uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', ...
        'string', label_clear, 'tooltipString', tip_clear,...
        'units', 'normalized', 'position', [0.2, 0, .2, 1], ...
        'callback', @clear_callback);

%----- Functions -----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [a, b, tau] = getValues()
    a = str2double(get(input_a, 'string'));
    b = str2double(get(input_b, 'string'));
    tau = str2double(get(input_tau, 'string'));
end
function sel_callback(source,~)
    if get(source,'SelectedObject') == rb1
        % show method 1
        set(method_text, 'string', label_method1);
        set(model_text, 'string', label_model1);
        image( image1, 'parent', ax);
    else
        % show method 2
        set(method_text, 'string', label_method2);
        set(model_text, 'string', label_model2);
        image( image2, 'parent', ax);
    end
end
function calc_callback(~, ~)
    [a, b, tau] = getValues();
    figure_y = figure_y - 30;
    graph_count = graph_count + 1;
    figure('Position', [figure_x figure_y, figure_width, figure_height],...
        'Name', [label_graph ' ' num2str(graph_count)],... % Title figure
        'NumberTitle', 'off'... % Do not show figure number
    );
    % determine the algorithm to calculate the result.
    if get(group,'SelectedObject') == rb1
        result = pointsPlotter2(a, b, tau, 1);
    elseif get(group,'SelectedObject') == rb2
        result = pointsPlotter2(a, b, tau, 2);
    end
    % check for result and set label.
    if isempty(result)
        set(result_text, 'string', label_result_bad);
        set(interval_text, 'string', '');
    else
        set(result_text, 'string', label_result_good);
        set(interval_text, 'string', ...
            ['(' num2str(result(1)) ' ', ' num2str(result(2)) ')'.'] );
    end
    set(close_btn, 'enable', 'on') ;
end
function resetFigureVars()
    figure_x = screen_width - figure_width;
    figure_y = screen_height - figure_height - 25;
    graph_count = 0;
end
% Closes all graphic windows.

```

```

function close_callback(~, ~)
    for n=1:graph_count
        try
            close([label_graph ' ' num2str(n)]);
        catch e
            display(e);
        end
    end
    resetFigureVars();
    set(close_btn, 'enable', 'off') ;
end
% Regenerate input values.
function random_callback(~, ~)
    set(input_a, 'string', num2str(rand(1)*2-1,4));
    set(input_b, 'string', num2str(rand(1)*2-1,4));
    set(input_tau, 'string', num2str(rand(1)*5,4));
end
% Clear input values.
function clear_callback(~, ~)
    set(input_a, 'string', '');
    set(input_b, 'string', '');
    set(input_tau, 'string', '');
end
end
end

```

## pointsPlotter2.m

```

function [result] = pointsPlotter2(a, b, tau, geometry)
    addPath('.../common');
    % Построение конуса устойчивости.
    cone();
    % Построение точек и вычисления.
    % Выбираем несколько (10) точек кривой и определяем находятся ли они внутри
    % конуса. Для этого находим собственные числа.
    result = [0 Inf];
    n = 100;
    t = 0:2*pi/(n-1):2*pi;
    j=1:n;
    if geometry == 1
        lambda = 1 + a*exp(1i*2*pi*j/n);
        mu = b*exp(-1i*2*pi*j/n);
        % Calculating point for displaying.
        U = [tau*b*cos(-t + a*tau*sin(t))
            tau*b*sin(-t + a*tau*sin(t))
            tau*(1 + a*cos(t))];
    elseif geometry == 2
        lambda = ones(1,n);
        mu = a*exp(1i*2*pi*j/n) + b*exp(-1i*2*pi*j/n);
        % Calculating point for displaying.
    end
end

```

```
U = [tau*abs(b+a)*cos(t)
      tau*abs(b-a)*sin(t)
      tau*ones(1, n)];
end
for j=1:n
    intervals = getIntervals(lambda(j), mu(j));
    result = intersection(result, intervals);
    % инвертируем результат, чтоб внешние точки отобразить красными.
    text(U(1,j), U(2,j), U(3,j), '*', 'color', [~isInside(intervals, tau) 0 0], 'fontsize', 20);
end
end
```



# Приложение В

## Исходный код программы «Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей»

### application3.m

```
function application3
    fontsize0 = 12;
    fontsize1 = 15;
    image1 = imread('../common/circles_right.png');
    image2 = imread('../common/circles.png');
    % Error strings
    label_error = 'Ошибка';
    err_incorrect_tau = 'Вы ввели некорректное значение tau.';
    err_incorrect_epsilon = 'You entered incorrect epsilon.';
    appTitle = 'Построение областей устойчивости круговых нейронных сетей';
    header = 'Построение областей устойчивости';
    header_eq = 'для круговых нейронных сетей';
    inputPanelTitle = 'Входные данные';
    label_method = 'Конфигурация нейронной сети';
    label_method1 = 'Круговое соединение нейронов с малым запаздыванием взаимодействия с правыми соседями';
    label_method2 = 'Круговое соединение нейронов с одинаковым запаздыванием взаимодействия с соседями';
    label_model1 = 'Модель сети:  $x''_j(t) + x_j(t) + a*x_{j-1}(t) + b*x_{j+1}(t-\tau) = 0, 1 \leq j \leq n$ ';
    label_model2 = 'Модель сети:  $x''_j(t) + x_j(t) + a*x_{j-1}(t-\tau) + b*x_{j+1}(t-\tau) = 0, 1 \leq j \leq n$ ';
    label_set_tau = 'Величина запаздывания tau = ';
    label_number = 'Число нейронов от ';
    label_number1 = 'до ';
    label_path = 'Путь для сохранения: ';
    label_ext = 'Расширение: ';
    label_epsilon = 'Точность: ';
    label_theSameScale = 'Одинаковый масштаб';
    label_calc = 'Рассчитать...';
    label_calc_tip = 'Определяет интервалы устойчивости системы, заданной матрицами A и B';
    % Create a figure that will have a uitable, axes and checkboxes
    f = figure('Position', [50, 100, 920, 600],...
        'Name', appTitle,... % Title figure
        'NumberTitle', 'off',... % Do not show figure number
        'MenuBar', 'none'); % Hide standard menu bar menus
    uicontrol('style', 'text', ...
        'string', header, ...
        'fontsize', fontsize1, ...
        'units', 'normalized', ...
```

```

        'position', [0, .95, 1, .05]);
uicontrol('style', 'text', ...
    'string', header_eq, ...
    'fontsize', fontsize1, ...
    'units', 'normalized', ...
    'position', [0, .9, 1, .05]);
rootPanel = uipanel('Parent',f, 'bordertype', 'none', 'Position',[0 0 1 1]);
%----- Input panel -----%
inputPanel = uipanel('Parent',rootPanel,'Title',inputPanelTitle,...
    'Position',[0 .1 1 .8]);
% input method
group = uibuttongroup('parent', inputPanel, 'Position',[0 .75 1 .25]);
uicontrol(group, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, 'string', label_method, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .3]);
set(group,'SelectionChangeFcn',@sel_callback);
rb1 = uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method1,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, .3, 1,.3]);
rb2 = uicontrol('parent',group, 'Style','Radio',...
    'fontsize', fontsize0, 'String',label_method2,...
    'units', 'normalized', 'pos',[0, 0, 1,.3]);
% first method
inputPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 1 .65]);
method_text = uicontrol(inputPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize1, ...
    'string', label_method1, 'units', 'normalized', 'position', [0, 0.85, 1, .2]);
model_text = uicontrol(inputPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0,...
    'string', label_model1, 'units', 'normalized', 'position', [0, 0.7, 1, .1]);
leftPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel1, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 .75 .7]);
% tau
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_set_tau, 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.75, .6, .15]);
input_tau = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', '0.5', 'backgroundcolor', 'w',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.6 .77 .15 .15]);
% min max number
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_number, 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.5, .6, .15]);
input_minnumber = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', '3', 'backgroundcolor', 'w',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.6 .52 .15 .15]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ....
    'string', label_number1, 'horizontalAlignment', 'center', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.75, 0.5, .1, .15]);
input_number = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', '3', 'backgroundcolor', 'w',...

```

```

        'units', 'normalized', 'position', [0.85 .52 .15 .15]);
% path
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_path, 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0, 0.25, .3, .15]);
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', [pwd '/'], 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.3, 0.25, .55, .15]);
input_dir = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', 'graphs', 'backgroundcolor', 'w',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.85 .28 .15 .15]);
% use the same scale for all plots
checkboxScale = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'checkbox', ...
    'string', label_theSameScale, ...
    'units', 'normalized', 'position', [0 .1 .25 .15]);
% extension
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_ext, 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.25, 0.08, .2, .15]);
extCombo = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'popupmenu', 'string', {'eps', 'png'}, ...
    'tooltipString', label_calc_tip,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.45 .1 .15 .15]);
% epsilon
uicontrol(leftPanel1, 'style', 'text', 'fontsize', fontsize0, ...
    'string', label_epsilon, 'horizontalAlignment', 'right', ...
    'units', 'normalized', 'position', [0.65, 0.1, .2, .15]);
input_epsilon = uicontrol(leftPanel1, 'style', 'edit', ...
    'string', '0.05', 'backgroundcolor', 'w',...
    'units', 'normalized', 'position', [0.85 .12 .15 .15]);
rightPanel1 = uipanel('Parent',inputPanel1, 'bordertype', 'none',...
    'Position',[.75 0 .25 .7]);
ax = axes('parent', rightPanel1, 'position', [0 0 1 1]);
image( image1, 'parent', ax);
%----- Bottom panel -----%
bottomPanel = uipanel('Parent',rootPanel,'bordertype', 'none',...
    'Position',[0 0 1 .1]);
uicontrol(bottomPanel, 'style', 'pushbutton', 'string', label_calc, ...
    'tooltipString', label_calc_tip,...
    'units', 'normalized', 'position', [0.75, 0, .25, 1], ...
    'callback', @calc_callback);
%----- Functions -----%
function [tau, minNumber, maxNumber, epsilon, dir, ext] = getValues()
    tau = str2double(get(input_tau, 'string'));
    minNumber = str2double(get(input_minnumber, 'string'));
    maxNumber = str2double(get(input_number, 'string'));
    dir = get(input_dir, 'string');
    epsilon = str2double(get(input_epsilon, 'string'));
    val = get(extCombo, 'value');
    values = get(extCombo, 'string');

```

```

        ext = values(val);
    end
function sel_callback(source, ~)
    if get(source, 'SelectedObject') == rb1
        % show method 1
        set (method_text, 'string', label_method1);
        set (model_text, 'string', label_model1);
        image( image1, 'parent', ax);
    else
        % show method 2
        set (method_text, 'string', label_method2);
        set (model_text, 'string', label_model2);
        image( image2, 'parent', ax);
    end
end
function calc_callback(~, ~)
    [tau, minNumber, maxNumber, epsilon, dir, ext] = getValues();
    if isnan(tau)
        str = err_incorrect_tau;
        errordlg(str, label_error, 'on');
        return;
    end
    if isnan(minNumber) || maxNumber < 3
        str = ['You entered incorrect min number of neurons. ' ...
            'It should be greater then 2.'];
        errordlg(str, label_error, 'on');
        return;
    end
    if isnan(maxNumber) || maxNumber < 3 || maxNumber < minNumber
        str = ['You entered incorrect max number of neurons. ' ...
            'It should be greater then 2 and not less then min number.'];
        errordlg(str, label_error, 'on');
        return;
    end
    if isnan(epsilon)
        str = err_incorrect_epsilon;
        errordlg(str, label_error, 'on');
        return;
    end
    if abs(epsilon) < 0.05
        warn_eps = questdlg(['Calculating boundness with little epsion ', ...
            'may spend a lot of time on slow machines. ' ...
            'You should try greater value before. ', ...
            'Are you sure you want to procesed?'], ...
            'Perfomance warning', 'Yes', 'No', 'No');
        switch warn_eps,
            case 'No', return;
        end % switch
    end
end

```

```

if abs(minNumber - maxNumber) > 7
    warn_eps = questdlg(['Calculating boundness for many numbers ', ...
        'of neurons may spend a lot of time on slow machines. ' ...
        'You should try greater value before. Are you sure you want to proceed?'], ...
        'Performance warning', 'Yes', 'No', 'No');
    switch warn_eps,
        case 'No', return;
    end % switch
end
if get(group,'SelectedObject') == rb1
    type = 1;
elseif get(group,'SelectedObject') == rb2
    type = 2;
end
mkdir(dir);
[minX, maxX] = plotterBoundness(type, tau, minNumber, epsilon, dir, ext);
if get(checkboxScale, 'value')
    for number=minNumber+1:maxNumber
        plotterBoundness(type, tau, number, epsilon, dir, ext, minX, maxX);
    end
else
    for number=minNumber+1:maxNumber
        plotterBoundness(type, tau, number, epsilon, dir, ext);
    end
end
end
end
end

```

## plotterBoundness.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Чертит границу устойчивости.
% type - тип соединения нейронов (1 для несимметричного, 2 для симметричного
% взаимодействия),
% tau - запаздывание,
% number - количество нейронов,
% epsilon - точность,
% dir - директория для сохранения графиков,
% ext - расширение файлов для сохранения,
% minX, maxX - границы для графиков.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [minX, maxX] = plotter_boundness(type, tau, number, epsilon, dir, ext, minX, maxX)
    % Создание окна для графика
    figure1 = figure('InvertHardcopy','off','Color',[1 1 1], ...
        'position', [680 0 600 570]);
    hold on;
    grid on;
    % Загрузка или создание данных для границы устойчивости бесконечного
    % числа нейронов.

```

```

datafile = [num2str(type) '_' num2str(tau) '.mat'];
try
    load(datafile);
catch me
    display(me);
    % предполагается, что файла данных нет.
end
% Если данные не загрузились, то создадим их.
if exist('infiniteR', 'var') == 0 || exist('infinitePhi', 'var') == 0
    infiniteNumber = 100;
    [infinitePhi, infiniteR] = solverBoundnessSmart(type, tau, infiniteNumber, .02);
    save(datafile, 'infinitePhi', 'infiniteR');
end
h = polar(infinitePhi, infiniteR, '-');
set(h, 'LineWidth', 3, 'color', 'k') ;
% Вычисление области устойчивости для ограниченного числа нейронов.
[phi, r] = solverBoundnessSmart(type, tau, number, epsilon);
polar(phi, r, 'o');
title(['$\tau = ' num2str(tau) ', n = ' num2str(number) '$' ],...
    'FontSize',20, 'interpreter', 'latex');
% Создание надписей
xlabel({'a'}, 'FontSize',16);
ylabel({'b'}, 'FontSize',16);
text('String','Stability',...
    'Position',[-.5 .2],...
    'FontSize',16);
text('String','Instability',...
    'Position',[-2.5 -1.2],...
    'FontSize',16);
text('String','Instability',...
    'Position',[1.2 2.5],...
    'FontSize',16);
text('Interpreter','latex',...
    'String',{'$n = ' num2str(number) '$' }},...
    'Position',[r(1) -.2],...
    'FontSize',16);
text('Interpreter','latex',...
    'String',{'$n = \infty$'},...
    'Position',[infiniteR(1) 0.2],...
    'FontSize',16);
% Масштабирование
ax=axis;
x1=min(ax(1), ax(3));
x2=max(ax(2), ax(4));
if exist('minX', 'var')
    x1=minX;
end
if exist('maxX', 'var')
    x2=maxX;

```

```

end
minX = x1;
maxX = x2;
axis([x1-.5 x2+.5 x1-.5 x2+.5]);
% Создание дополнительных границ
ax=axis;
plot(ax(1:2), [ax(4) ax(4)], 'k', 'LineWidth', 1);
plot([ax(2) ax(2)], ax(3:4), 'k', 'LineWidth', 1);
axis([x1-.5 x2+.5 x1-.5 x2+.51]);
% Сохранение построенной фигуры
if type == 1
    typeName = 'asym';
else
    typeName = 'sym';
end
strTau = num2str(tau);
if length(strTau) < 3
    strTau = [strTau '_0'];
end
%mkdir(dir);
figureName = [typeName '-' strTau '-' num2str(number)];
% Заменяем точку на '_', чтоб не было проблем в файловой системе.
figureName = strrep(figureName, '.', '_');
set(figure1, 'PaperPositionMode', 'auto');
if strcmp(ext, 'png')
    saveas(figure1, [dir filesep figureName '.png'], 'png');
else
    saveas(figure1, [dir filesep figureName '.eps'], 'psc2');
end
close;
end
end

```

## solverBoundnessSmart.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Вычисляет точки области устойчивости с заданной точностью epsilon, так
% чтобы они находились на одинаковом расстоянии друг от друга.
% type - тип соединения нейронов (1 для несимметричного, 2 для симметричного
% взаимодействия),
% tau - запаздывание,
% number - количество нейронов,
% epsilon - точность,
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [phi r] = solver_boundness_smart(type, tau, number, epsilon)
    radius = 2*epsilon;
    r = zeros(1, 1000);
    phi = zeros(1, 1000);
    % Вычисляем первую точку на луче '0a'.
    phi(1) = 0;

```

```

[r(1)] = searchPointInRowGeom(type, number, tau, 0, radius);
% Все другие точки находим, переходя в локальную полярную систему
% координат, на заданном расстоянии radius от предыдущей.
n=1;
while n<1000
    [r(n+1), phi(n+1)] = searchNeighbourhoodPoint(r(n), phi(n), radius);
    n = n+1;
    if phi(n-1) - phi(n) > 1
        break
    end
end
phi = phi(1:n);
r = r(1:n);
% Переводит точку от полярной СК к декартовой.
function [x y] = translate (r, phi, r1, phi1)
    x = r*cos (phi) + r1*cos (phi + phi1);
    y = r*sin(phi) + r1*sin(phi + phi1);
end
% Переводит точку от декартовой СК к полярной.
function [r, phi] = toPolar(x, y)
    r = sqrt(x^2 + y^2);
    if x>0
        if y>=0
            phi = atan(y/x);
        else
            phi = atan(y/x) + 2*pi;
        end
    elseif x < 0
        phi = atan(y/x) + pi;
    else %if x == 0
        if y > 0
            phi = pi/2;
        elseif y<0
            phi = 3*pi/2;
        else
            phi = 0;
        end
    end
end
end
% Ищет следующую точку на заданном расстоянии radius от предыдущей.
function [rEnd phiEnd] = searchNeighbourhoodPoint(r, phi, radius)
    phi0 = 0;
    phi1 = pi;
    for jj=1:10
        phiHalf = (phi1+phi0)/2;
        [xHalf yHalf] = translate(r, phi, radius, phiHalf);
        stabHalf = straightStabAnalyzer(type, xHalf, yHalf, number, tau);
        if stabHalf == 1
            phi1 = phiHalf;
        end
    end
end

```



```

        else
            phi0 = phiHalf;
        end
    end
end
[rEnd phiEnd] = toPolar(xHalf, yHalf);
end
end
end

```

## searchPointInRowGeom.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Находит точку границы области устойчивости на луче, определённом углом
% phi в полярной системе координат с заданной точностью epsilon.
% Возвращает координату точки на заданном луче с точностью epsilon.
% type - тип соединения нейронов (1 для несимметричного, 2 для симметричного
% взаимодействия).
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [half] = searchPointInRowGeom(type, number, tau, phi, epsilon)
r = [0 2];
stab = straightStabAnalyzer(type, r(2)*cos(phi), r(2)*sin(phi), number, tau);
while stab
    r(2) = r(2) + 1;
    stab = straightStabAnalyzer(type, r(2)*cos(phi), r(2)*sin(phi), number, tau);
end
for iter = 1:20
    %disp(' ');
    %disp(['Step ' num2str(iter) ' =====>'])
    half = sum(r)/2;
    stab = straightStabAnalyzer(type, half*cos(phi), half*sin(phi), number, tau);
    if stab
        r(1) = half;
    else
        r(2) = half;
    end
    if abs(r(1) - r(2)) < epsilon
        %disp(['Stopped on ' num2str(iter)]);
        %return;
    end
end
end
end

```

## straightStabAnalyzer.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Проверяет данную точку на устойчивость непосредственно, используя
% годограф.
% type - тип соединения нейронов (1 для несимметричного, 2 для симметричного
% взаимодействия),
% a, b - коэффициенты уравнения,

```

```

% number - количество нейронов,
% tau - запаздывание.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [stab] = straightStabAnalyzer(type, a, b, number, tau)

    j = 1:number;
    % Вычисление собственных чисел.
    if type == 1 % первый тип соединения нейронов.
        lambda = 1 + a*exp(1i*2*pi.*j/number);
        mu = b*exp(-1i*2*pi.*j/number);
    else % второй тип соединения нейронов.
        lambda = ones(size(j));
        mu = a*exp(1i*2*pi.*j/number) + b*exp(-1i*2*pi.*j/number);
    end

    % Находим w, которая является параметром для точки первого пересечения
    % годографа с осью 0a.
    PI=2*pi;
    w=0:PI/100:PI;
    maxW = zeros(1, number) ;
    for k=j
        z = tau*real(lambda(k));
        if z < -1
            stab = false;
            return;
        end
        ycone = -z.*sin(w)- w.*cos(w) ;
        jj =1;
        while ycone(jj) <= 0
            jj = jj+1;
        end
        maxW(k) = w(jj) ;
    end

    % Для каждой из точек Mj срезаем конус на высоте её третьей компоненты
    % (переводим задачу на плоскость), затем определяем, лежит ли эта точка
    % в овале устойчивости или нет.
    for k=j
        PI = maxW(k) ;
        w=-PI:PI/100:PI;
        m = mu(k) ;
        la = lambda(k) ;
        x = tau*abs(m).*cos(arg(m) + tau*imag(la));
        y = tau*abs(m).*sin(arg(m) + tau*imag(la));
        z = tau*real(la);
        xccone = w.*sin(w) - z.*cos(w);
        yccone = -w.*cos(w) - z.*sin(w) ;
        % Находим расстояние от каждой точки овала устойчивости до Mj.
        distArr =(x-xccone).^2 +(y-yccone).^2 ;
        % Находим точку овала, наиболее близкую к точке Mj.
        minInd1 = 1;
        minInd2 = 2;
    end

```

```
for jj= 2:length(distArr)
    if distArr(jj) < distArr(minInd1)
        minInd2 = minInd1;
        minInd1 = jj ;
    end
end
distCone = (xcone(minInd1)-1)^2 + ycone(minInd1)^2;
distPoint = (x-1)^2 + y^2;
% Если расстояние от начала координат до точки Mj больше, чем до
% ближайшей точки овала, то исследуемая пара значения а, b является
% неустойчивой и дальнейшее выполнение функции не имеет смысла.
if distPoint > distCone
    stab = 0;
    return;
end
end
% Если протестированы все точки Mj и среди них не оказалось
% неустойчивых, то исследуемая пара значения а, b является устойчивой.
stab = 1;
end
```

# Приложение Г

## Общие исходные коды программ

### arg.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% По действительной и мнимой частям комплексного числа
% находит его аргумент в пределах [-pi, pi].
% Функция также работает с вектором комплексных чисел,
% получая при этом соответствующий вектор аргументов.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [result] = arg(x)
% Preallocating variable result.
result = zeros(1, length(x));
if length(x)>1
    for k=1:length(x)
        result(k)=arg(x(k));
    end
    result = result';
    return;
end
a=real(x); b=imag(x);
if a>0 && b==0
    result=0;
elseif a>0 && b>0
    result=atan(b/a);
elseif a==0 && b>0
    result=pi/2;
elseif a<0 && b>0
    result=pi+atan(b/a);
elseif a<0 && b==0
    result=pi;
elseif a<0 && b<0
    result=-pi+atan(b/a);
elseif a==0 && b<0
    result=-pi/2;
elseif a>0 && b<0
    result=atan(b/a);
end
```

### coalition.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Возвращает массив чётной длины, представляющий собой упорядоченный набор
% множеств (отрезков) и являющийся объединением наборов множеств set1 и set2.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function result = coalition(set1, set2)

    % проверка входных параметров.
    validate(set1);
    validate(set2);

    % проверка на пустое множество.
    if isempty(set1)
        result = set2;
        return;
    elseif isempty (set2)
        result = set1;
        return;
    end

    % Now dimension of set1, set2 >= 2.
    complexSet = []; % Determine complex set.
    set = [];
    if length (set1) == 2
        complexSet = set2;
        set = set1;
    elseif length (set2) == 2;
        complexSet = set1;
        set = set2;
    else
        result = set1;
        for n=1:2:length(set2)
            result = coalition1(result, set2(n:n+1));
        end
        return;
    end

    % Perform coalition complex and simple set.
    % First and last indexed of simple set in the complexSet.
    maxIndex = length(complexSet)+1;
    first=maxIndex;
    last=maxIndex;
    for n=1:length(complexSet)
        if first == maxIndex && set(1)<complexSet(n)
            first = n;
        end
        if last == maxIndex && set(2)<complexSet(n)
            last = n;
        end
    end

    % Insert simple set into complex set.
    if mod (first,2) == 1 % odd index
        if first == last
            result = [complexSet(1:first-1), set, complexSet(last:end)];
            return;
        elseif last>length (complexSet)
            result = [complexSet(1:first-1), set];
            return;
        end
    end
end
```

```

end
if mod (last, 2) == 1 % odd index
    result = [complexSet(1:first-1), set, complexSet(last:end)];
    return;
else
    result = [complexSet(1:first-1), set(1), complexSet(last:end)];
    return;
end
else % first index even.
    if first == last
        result = complexSet;
        return;
    end
    if mod (last, 2) == 1 % odd index
        result = [complexSet(1:first-1), set(2), complexSet(last:end)];
        return;
    else
        result = [complexSet(1:first-1), complexSet(last:end)];
        return;
    end
end
end
% Проверяет, что массив имеет чётную длину и состоит из неубывающих
% значений.
function validate(set)
    if mod(length(set), 2) == 1
        error(['Input array [' num2str(set) '] should has the even length!']);
    end
    for n=1:length(set)-1
        if set(n)>set(n+1)
            error(['Input array [' num2str(set) ...
                '] should consist of increasing values!']);
        end
    end
end
end
end
end

```

## getIntervals.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Вычисляет интервалы устойчивости по tau.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function result = getIntervals(lambda, mu)
    % Simple cheking for stability.
    if real(lambda) > abs(mu)
        %disp('INFO: stability anyway!');
        result = [0 Inf];
        return;
    end
    % Perform necessary calculations.

```

```

Q = sqrt((abs(mu))^2 - (real(lambda))^2);
M = 15;
m = -M:M;
tau_plus = (arg(1i*Q - real(lambda)) + 2*pi*m - arg(mu)) / ...
            (imag(lambda) + Q);
tau_minus = (arg(-1i*Q - real(lambda)) + 2*pi*m - arg(mu)) / ...
            (imag(lambda) - Q);
% Check if atau in [0, pi/Q].
baund = pi/Q;
all = [tau_plus, tau_minus]; % concatenate arrays.
k=1;
for j = 1 : length(all)
    atau = all(j);
    if atau > 0 && atau <= baund && real(lambda) >= -Q/tan(Q*atau)
        result_set(k) = atau;
        k = k+1;
    end
end
if exist('result_set', 'var') == 0
    %disp('INFO: empty set!');
    result = [];
    return;
end
% Check if [0, tau1] is included in the result set.
if (real(lambda) > 0 && mu > -pi/2 && mu < pi/2) % spiral goes up.
    result_set = [0 result_set]; % add zero to result set.
elseif (real(lambda) > 0 && (real(lambda)) > abs(real(mu))) % spiral goes up.
    result_set = [0 result_set]; % add zero to result set.
elseif (real(lambda) < 0 && abs(real(lambda)/real(mu)) < 1)
    result_set = [0 result_set]; % add zero to result set.
end
% Sort the result set.
%disp('INFO: Sorted set: ');
result_set = sort(result_set);
% Remove the same values.
if length(result_set) > 1
    cleanSet = result_set;
    if abs(result_set(1)-result_set(2)) < 0.000001 %result_set(1) == result_set(2)
        cleanSet = cleanSet(2:end);
    end
    for k = 2:length(result_set)-1
        if abs(result_set(k)-result_set(k+1)) < 0.000001 %result_set(k) == result_set(k+1)
            cleanSet = [cleanSet(1:k-1), cleanSet(k+1:end)];
        end
    end
    result_set = cleanSet;
end
% Check for even.
if mod(length(result_set), 2) == 1

```

```

        %disp('WARNING: stability interval has the odd lenth!!!');
        result_set = [0 result_set];
    end
    result = result_set;
end

```

## intersection.m

```

% Returns intersection set of 'set1' and 'set2'.
% 'set1' and 'set2' need to be even.
function result = intersection(set1, set2)
% Simple checking for empty set.
if isempty(set1) || isempty(set2)
    result = [];
    return;
end
% Check for the even lenth.
if mod(length(set1), 2) == 1 || mod(length(set2), 2) == 1
    error('Input arrays ''set1'' and ''set2'' must has the even length!');
end
% Check order.
% Perform simple checking of two intervals.
if length(set1)==2 && length(set2)==2
    result = [max(set1(1), set2(1)), min(set1(end), set2(end))];
    if result(1) > result(2)
        result = [];
    end
    return;
end
% Decomposition.
if length (set1) > 2 || length (set2) > 2
    result = [] ;
    for n = 1:2:length (set1)
        for k = 1:2:length (set2)
            set = intersection(set1(n:n+1) , set2(k:k+1)) ;
            result = coalition(set, result) ;
        end
    end
end
end

```

## isInside.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Определяет принадлежность tau множеству интервалов 'evenSet'.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function result = isInside(evenSet, tau)
% Supporting 'tau' as array.
result = zeros(1, length(tau));
if length(tau)>1

```



```

        for k=1:length(tau)
            result(k) = isInside(tau(k));
        end
        result = result';
        return;
    end
    % Check for even.
    if mod(length(evenSet), 2) == 1
        error('Input array ''evenSet'' must has the even length!');
    end
    % Check if tau is included in one of the interval.
    for j = 1:2:length(evenSet)
        if evenSet(j) < tau && tau < evenSet(j+1)
            result = 1;
            return;
        end
    end
    % tau is excluded from all intervals.
    result = 0;
end

```

## cone.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Строит конус устойчивости.
% Usage: cone(lambda, mu),
%         where lambda, mu are the eigenvalues of matrixes A, B.
% Example:
% cone ([0.06+1.8658i 0.06-1.8658i],[0.025+0.1555i 0.025-0.1555i], 7, 0.5)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function cone
    if exist('n', 'var') == false
        n=100;
    end
    % Построение конуса.
    tau_cone = 1;
    W = pi/tau_cone-0.5; %pi/6;
    w=-W:2*W/100:W;      %вектор для реализации основания конуса(круг)
    %z=-1/tau_cone:0.1:1.5;      %накопление вектора z
    z=-w./tan(w*tau_cone);
    [W,Z]=meshgrid(w,z);      %задание 3-х мерной матрицы(пространства)
    X=W.*sin(tau_cone*W) - Z.*cos(tau_cone*W); %задание вектора фигуры по оси x
    Y=-W.*cos(tau_cone*W) - Z.*sin(tau_cone*W); %задание вектора фигуры по оси y
    for ii=n/2+1 : n+1
        for j=1 : n+1
            Z(ii,j)=1;%tau_cone/(tau_cone);
            X(ii,j)=1-z(50);
            Y(ii,j)=0;
        end
    end

```

```
    for j=1:1:ii-51
        X(ii-50,j)=X(ii-50,ii-50);
        X(ii-50,102-j)=X(ii-50,ii-50);
        Y(ii-50,j)=0;
        Y(ii-50,102-j)=0;
    end
end
% Отрисовка конуса по 3-м заданным координатам.
hold on;
hold on;
shading interp;
colormap(gray);
mesh(X, Y, Z)
xlabel('$u_1$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 30);
ylabel('$u_2$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 30);
zlabel('$u_3$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 30);
view([-30 30]);
alpha(.2);
end
```