

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

**методические указания к выполнению лабораторных работ**

## **АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Направление подготовки 15.04.04  
«Автоматизация технологических процессов и производств»  
Направленность (профиль) «Информационно-управляющие системы»  
Форма обучения - очно-заочная  
Год начала обучения 2022  
Реализуется в 4 семестре

Невинномысск 2022

## **Введение**

На современном этапе большое внимание уделяется вопросам повышения качества регулирования. Это становится еще более актуальным в случае объектов и процессов, обладающих нестационарными динамическими характеристиками. Эффективность проектируемой системы управления может быть обеспечена за счет адаптации настроек ее составных элементов в процессе работы, т.е. созданием адаптивных САУ. Помимо этого к самим адаптивным устройствам можно предъявлять дополнительные требования, которые касаются не только простоты их алгоритмов функционирования, но также их конструктивной простоты. В этой связи оправдано применение параметрической адаптации регуляторов на основе типовых законов регулирования и адаптивных алгоритмов, особенно, в отношении сложных систем регулирования и управления, настраиваемых с помощью правил.

Инженерная и управленческая деятельность невозможна без развития у будущего специалиста инженерного профиля способностей к анализу информации, ее обработке и принятию решений. Использование современных пакетов моделирования и современных прикладных систем обработки данных на персональных компьютерах является необходимым условием приобретения будущим магистром опыта аналитического и алгоритмического мышления в процессе учебы.

Лабораторный практикум направлен на получение практических навыков обработки информации при построении адаптивных систем управления в современных инженерных средах таких, как MATLAB, MATHCAD, fuzzy TECH. Профессиональные редакции fuzzy TECH, поддерживающие многие из последних достижений нечеткой технологии, позволяют студентам освоить методы, принципы и алгоритмы построения адаптивных систем на основе нечеткой логики и нейросетевой технологии.

Особое внимание обращается на освоение студентами современных методов синтеза и анализа беспроисковых адаптивных систем управления.

### **Порядок выполнения и защиты лабораторных работ**

Каждая лабораторная работа посвящена получению навыков по решению конкретных задач, перечень задач обозначен в цели и содержании лабораторной работы. После внимательного изучения поставленных задач студент, используя справку к данной программе и электронные учебники кафедры, изучает методы решения поставленных задач, после чего приступает к выполнению заданий.

После успешного выполнения заданий студенты представляют результаты преподавателю в электронном виде.

После проверки результатов преподаватель допускает студента к защите, в ходе которой студенту предлагается ответить на контрольные вопросы для проверки и закрепления теоретических знаний и практических навыков по изучаемой теме.

## Содержание

Лабораторная работа № 1 Исследование системы автоматического управления (САУ) с переменной структурой (СПС) методом фазовой плоскости .....	4
Лабораторная работа № 2 Исследование релейной системы со скользящим режимом работы .....	13
Лабораторная работа № 3 Проектирование адаптивных систем управления с использованием нечеткой логики .....	19
Лабораторная работа № 4 Проектирование адаптивных систем управления на основе гибридных нейро-нечетких систем .....	35
Литература .....	38

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ) С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ (СПС) МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

Цель работы: изучение адаптивных свойств САУ с переменной структурой методом фазовой плоскости.

#### 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

**Фазовой плоскостью** называется плоскость, по осям которой откладываются координаты системы, однозначно характеризующие ее состояние. Обычно по оси абсцисс откладывают значения регулируемой характеристики или ошибки системы, по оси ординат – производную по времени.

Каждому состоянию системы на фазовой плоскости соответствует определенная точка, называемая изображающей или фазовой точкой. При изменении состояния системы изображающая точка совершает движение по фазовой траектории. Совокупность фазовых траекторий, соответствующих всевозможным начальным условиям, называется фазовым портретом системы.

По фазовому портрету можно сделать заключение о таких свойствах системы, как устойчивость и качество движения. Поэтому исследование АСУ методом фазовой плоскости по существу сводится к построению фазового портрета. Необходимо отличать характер изображения движения системы на фазовой плоскости от изображения на временной плоскости в виде кривой переходного процесса.

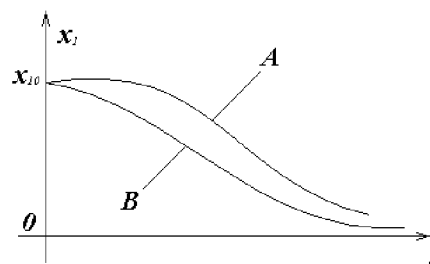


Рисунок 1

Например, можно показать эти различия при определении быстродействия системы. Рассмотрим кривые переходных процессов систем А и В (рисунок 1).

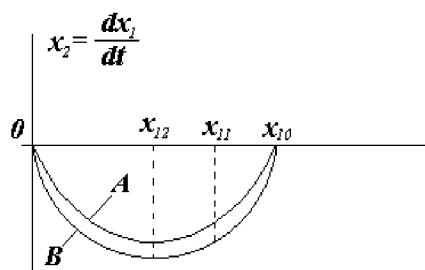


Рисунок 2

Переходный процесс в системе В заканчивается быстрее, чем в системе А, следовательно, система В более быстродействующая по сравнению с системой А. Соответствующие фазовые траектории систем на фазовой плоскости изображены на рисунке 2. По расположению траекторий также можно судить о быстродействии систем А и В.

Поскольку

$$x_2 = \frac{dx_1}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{dx_1}{x_2} = dt, \quad (1)$$

то, интегрируя на участке  $(x_{11} - x_{12})$  это равенство, имеем

$$\int_{x_{11}}^{x_{12}} \frac{dx_1}{x_2} = \int_0^t dt \quad \text{или} \quad t = \int_{x_{11}}^{x_{12}} \frac{dx_1}{x_2} \quad (2)$$

Следовательно, чем ниже фазовая траектория (чем больше  $x_2 = dx_1/dt$ ), тем меньше  $t$  и выше быстродействие системы.

Таким образом, для более быстродействующей системы В площадь под кривой переходного процесса меньше, а площадь под фазовой траекторией больше, чем соответствующие площади для системы А.

Изучение систем с переменной структурой представляет большой интерес в связи с тем, что класс СПС занимает промежуточное положение между линейными и нелинейными (в частности релейными) системами. Поэтому на примере системы с переменной структурой можно наглядно проследить за тем, как системам автоматического регулирования придаются качественно новые свойства путем одновременного сочетания полезных свойств линейных и нелинейных систем.

Одним из интересных свойств СПС является возможность сочетания нелинейным образом различных линейных структур в составе единой системы регулирования.

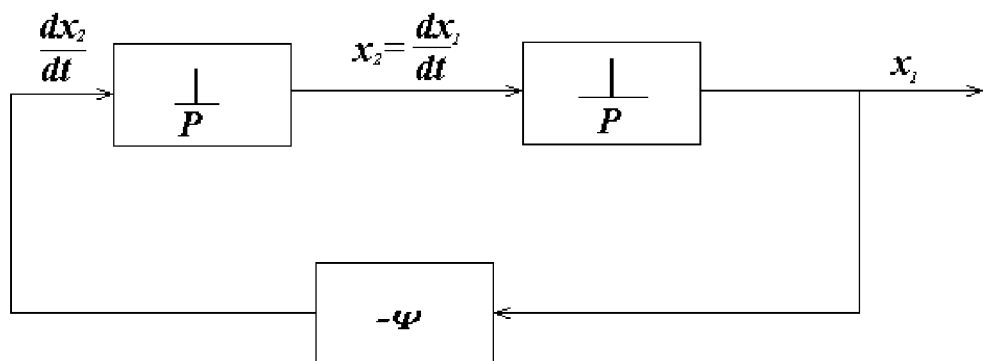


Рисунок 3

Структура системы автоматического регулирования определяется составом функциональных элементов и характером связей между ними.

Например, имеется линейная структура, изображенная на рисунке 3, состоящая из двух последовательно соединенных интегрирующих звеньев и элемента отрицательной обратной связи  $-\psi$ .

Уравнение такой системы можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\psi x_1. \end{cases} \quad (3)$$

Пусть  $\psi = \omega^2$ , тогда уравнение свободного движения системы имеет следующий вид:

$$\frac{dx_2}{dt} = -\omega^2 x_1 \quad \text{или} \quad \frac{dx_2}{dt} + \omega^2 x_1 = 0. \quad (4)$$

Учитывая, что  $\frac{dx_2}{dt} = \frac{d^2 x_1}{dt^2}$ , имеем  $\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \omega^2 x_1 = 0$ .

Характеристическое уравнение  $\lambda^2 + \omega^2 = 0$ . Корни характеристического уравнения чисто мнимые  $\lambda_{1,2} = \pm j\omega$ , поэтому данной линейной структуре соответствует фазовый портрет в виде семейства вложенных эллипсов (рисунок 4).

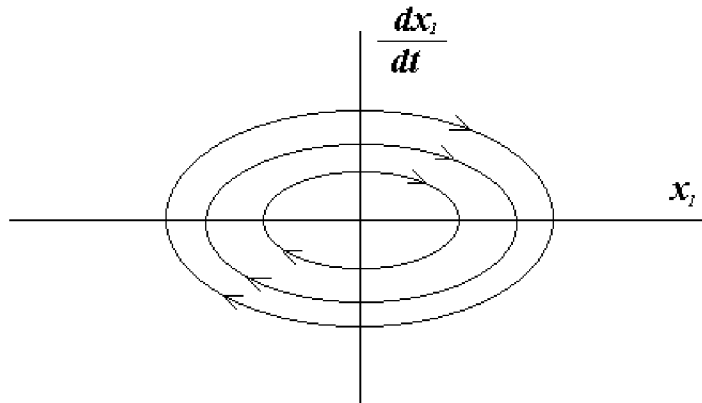


Рисунок 4

Изменим характер обратной связи в системе, положив  $\psi = -\omega^2$ . Тогда уравнение свободного движения для новой линейной структуры имеет следующий вид:

$$\frac{dx_2}{dt} = \omega^2 x_1 \quad \text{или} \quad \frac{dx_2}{dt} - \omega^2 x_1 = 0. \quad (5)$$

Характеристическое уравнение  $\lambda^2 - \omega^2 = 0$  имеет корни вещественные, разных знаков  $\lambda_{1,2} = \pm\omega$ . Этой линейной структуре соответствует фазовый портрет гиперболического типа (рисунок 5).

На основании фазовых портретов рассмотренных линейных структур можно заключить, что ни одна из структур не обладает удовлетворительными динамическими свойствами как в отношении устойчивости, так и качества движения. Однако отдельные участки портретов (изображены на рисунке 6 сплошными линиями) и могут быть использованы в нелинейной системе, приспособленной для сочетания таких удовлетворительных участков. Очевидно, в нелинейной системе на линиях переключения ( $x_1=0$ ), (ось  $dx_1/dt$ ) и  $(\frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 = 0)$  знак обратной связи должен изменяться, а изображающая точка должна переходить с фазовой траектории одной линейной структуры на фазовую траекторию другой линейной структуры.

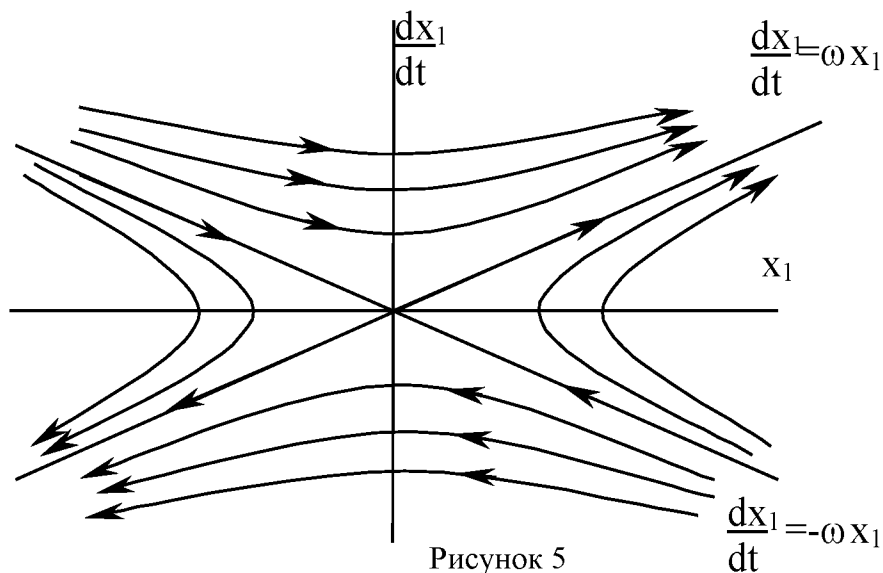


Рисунок 5

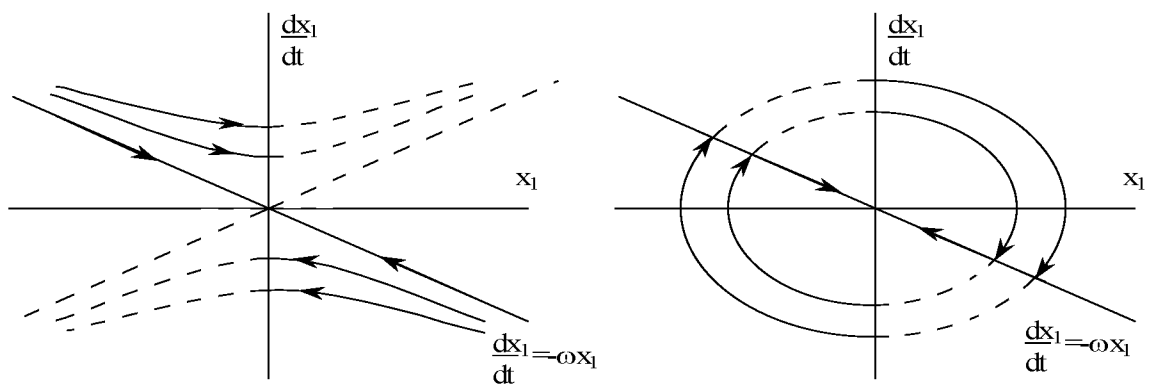


Рисунок 6

Указанная возможность имеется в системе с переменной структурой, которая содержит в управляющем устройстве логические ключевые элементы, скачком разрывающие или восстанавливающие связи в системе в зависимости от ее фазового состояния, и тем самым изменяющие структуру регулятора.

Соединив за счет логического переключения структур удовлетворительные участки фазовых портретов, получим фазовый портрет СНС (рисунок 7).

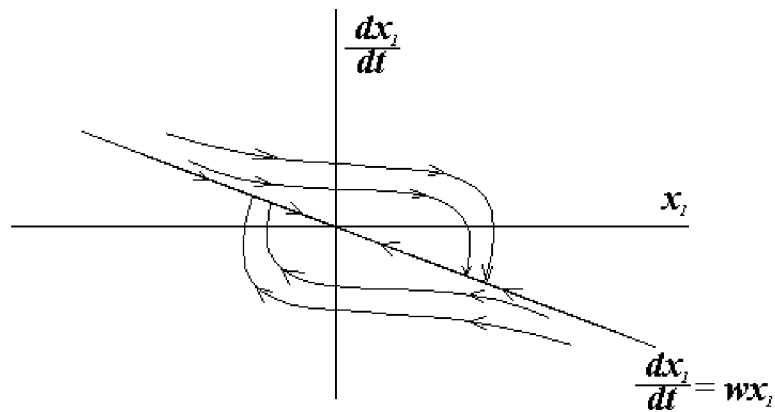


Рисунок 7

Такой фазовый портрет характеризует систему как устойчивую и обладающую хорошими качественными свойствами.

Изменяя наклон линии переключения

$$S = \frac{dx_1}{dt} + cx_1 = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } c = \begin{cases} > \omega \\ = \omega \\ < \omega \end{cases},$$

можно изменять показатели качества движения системы. Структурная схема такой системы с переменной структурой изображена на рисунке 8.

Найдем закон переключения логического устройства. В соответствии с фазовыми портретами первая линейная структура ( $\psi = \omega^2$  – эллипс) должна существовать в секторах,

где либо  $x_1 > 0$  и фазовые точки находятся выше линии  $\frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 = 0$ , либо  $x_1 < 0$  и фа-

зовые точки находятся ниже линии переключения  $\frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 = 0$ . Это условие можно за-

писать:



$$\psi = \omega^2 \begin{cases} \text{при } x_1 > 0 \text{ и } \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 > 0; \\ \text{при } x_1 < 0 \text{ и } \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 < 0, \end{cases} \quad (8)$$

или короче

$$\psi = \omega^2 \text{ при } x_1 \left( \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 \right) > 0. \quad (9)$$

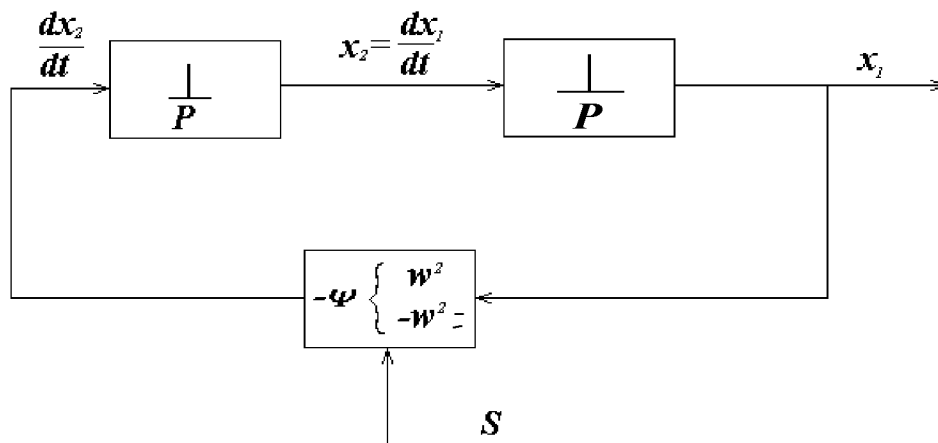


Рисунок 8

В противном случае должна существовать вторая линейная структура (гиперболическая, в оставшихся секторах). Второе условие записывается аналогично:

$$\psi = -\omega^2 \text{ при } x_1 \left( \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 \right) < 0. \quad (10)$$

Таким образом, переключения логического элемента происходят по следующему закону:

$$\psi = \begin{cases} \omega^2, \text{ если } x_1 \cdot \left( \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 \right) > 0; \\ -\omega^2, \text{ если } x_1 \cdot \left( \frac{dx_1}{dt} + \omega x_1 \right) < 0. \end{cases} \quad (11)$$

## 2 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью программно-реализованных блоков системы моделирования MATLAB собрать структурную схему системы, изображенную на рисунке 3 и состоящую из двух последовательно соединенных интегрирующих звеньев и элемента отрицательной обратной связи  $-\psi$  (принять  $\psi = 1$ ).

2. Задавая на соответствующих интеграторах начальные условия из таблицы 1, получить переходной процесс и фазовый портрет исследуемой системы.

3. Определить параметры автоколебаний при заданных начальных условиях. Построить графики зависимости амплитуды  $A$  и частоты автоколебаний  $\omega$  от изменения начальных условий.

4. С использованием программно-реализованных блоков системы моделирования MATLAB собрать структурную схему САУ с переменной структурой, изображенную на рисунке 8 и реализующую алгоритм управления (11).

5. Задавая на соответствующих интеграторах начальные условия из таблицы 1 и принимая при каждой паре заданных начальных условий коэффициент  $c = \begin{cases} > \omega \\ = \omega \\ < \omega \end{cases}$  в линии переключения, получить в системе с переменной структурой скользящий режим.

6. По полученным графикам переходных процессов и фазовым портретам проследить, что, меняя наклон линии переключения, можно изменять показатели качества движения системы. На основании этого сделать выводы об устойчивости и качестве движения системы, а также дать характеристику режимам с переменной структурой.

### 3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о выполнении лабораторной работы должен включать:

1. Структурную схему системы, изображенную на рисунке 3 и состоящую из двух последовательно соединенных интегрирующих звеньев и элемента отрицательной обратной связи  $-\psi$ , и ее схему моделирования.

2. Структурную схему САУ с переменной структурой, изображенную на рисунке 8 и реализующую алгоритм управления (11), и ее схему моделирования.

3. Результаты наблюдений движений изображающих точек по фазовым траекториям.

4. Фазовые портреты для всех вариантов структуры системы и положений линий переключения.

5. Выводы по характеру режимов в исследуемой системе автоматического управления.

### 4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается метод фазовой плоскости и его особенности?

2. Охарактеризуйте сходства и различия графических изображений в виде переходных процессов и фазовых траекторий.

3. Как можно судить об устойчивости и качестве движения системы по фазовому портрету?

4. Какие автоматические системы управления можно исследовать методом фазового пространства?

5. Какие системы регулирования относятся к классу систем с переменной структурой?

6. Что такое скользящий режим и как его можно получить в системе с переменной структурой?

7. Почему ключевые элементы в системе с переменной структурой называются логическими переключающими устройствами?

Таблица 1 – Исходные данные

Номер варианта	Начальные условия	
	$x'(0)$	$x(0)$
1	-25	25
	-45	45
	-65	65
2	-15	15
	-35	35
	-55	55
3	-10	10
	-30	30
	-50	50
4	-35	35
	-55	55
	-75	75
5	40	40
	60	60
	80	80
6	30	30
	50	50
	70	70
7	-45	45
	-65	65
	-85	85
8	-25	25
	-35	35
	-45	45
9	-15	15
	-25	25
	-35	35
10	-10	10
	-20	20
	-30	30

Продолжение таблицы 1

Номер варианта	Начальные условия	
	$x'(0)$	$x(0)$
11	-35	35
	-45	45
	-55	55
12	-30	30
	-40	40
	-50	50
13	25	25
	45	45
	65	65
14	15	15
	35	35
	55	55
15	10	10
	30	30
	50	50
16	35	35
	55	55
	75	75
17	40	40
	60	60
	80	80
18	-30	30
	-50	50
	-70	70
19	-40	40
	-60	60
	-80	80
20	-45	45
	-55	55
	-65	65

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СО СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Цель работы: исследование переходных процессов релейной системы со скользящим режимом работы, эквивалентной адаптивной.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Пусть задана АСР, структурная схема которой приведена на рисунке 1. Уравнения динамики АСР имеют вид:

$$\begin{aligned} p^2 x &= k_1 x_2, \\ x_2 &= F(x) = c \cdot \text{sign} x_1, \\ x_1 &= -x - x_{oc} = -(1 + K_{oc} p)x. \end{aligned} \tag{1}$$

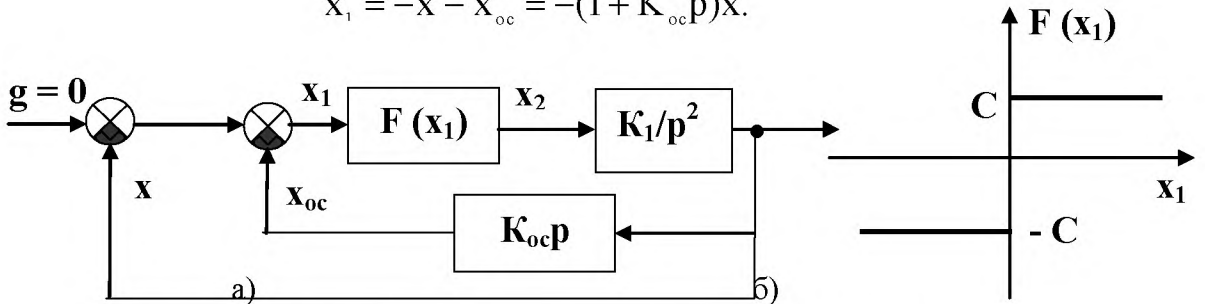


Рисунок 1 – Структурная схема релейной АСР

Эти уравнения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= -K_1 c \cdot \text{sign}(x + K_{oc} y). \end{aligned} \tag{2}$$

Дифференциальные уравнения фазовых траекторий:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{K_1 c}{y} \text{sign}(x + K_{oc} y). \tag{3}$$

Линия переключения на фазовой плоскости (x, y) описывается уравнением:

$$\begin{aligned} S &= x + K_{oc} y; \\ 0 &= x + K_{oc} y; \\ y &= -\frac{1}{K_{oc}} x. \end{aligned} \tag{4}$$

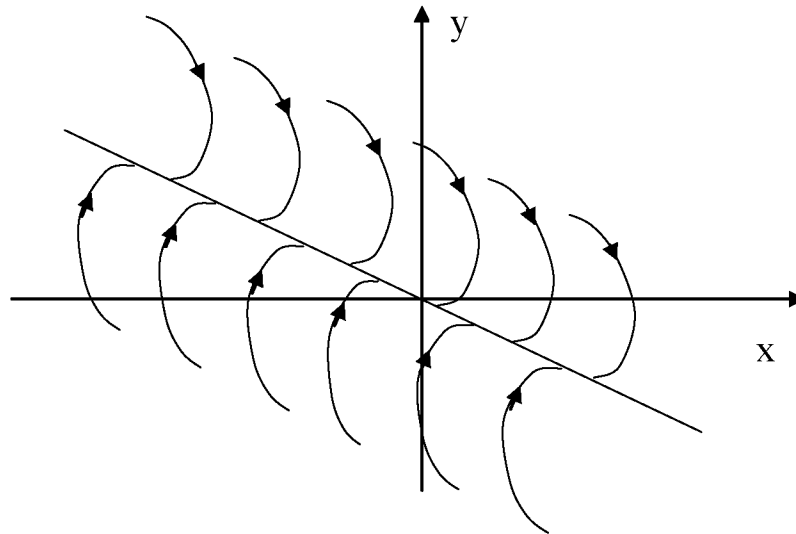


Рисунок 2 – Фазовые траектории релейной АСР

Уравнения фазовых траекторий из (3) примут вид:

$$\begin{aligned} ydy &= -K_1 c dx; \\ y^2 &= -2K_1 cx + C_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, фазовые траектории – это параболы, ветви которых направлены в отрицательную сторону оси X. Положение вершины параболы определяется произвольной постоянной  $C_1$ , то есть начальными условиями переходного процесса  $x(t_0)$  и  $y(t_0)$ . Эти параболы изображены справа от линии переключения. Направление движения по параболом определяется правилом для направления движения по фазовым траекториям:

- а) в верхней полуплоскости (рисунок 3) – слева направо, то есть в сторону увеличения  $x$ , так как скорость  $y > 0$ ;
- б) в нижней полуплоскости – справа налево;
- в) ось  $x$  пересекается фазовыми траекториями под прямым углом, так как скорость  $y = 0$ , то есть имеет максимум или минимум величины  $x$ .

Слева от линии переключения  $x + K_{oc}y < 0$ , и уравнение фазовых траекторий (3) имеет вид:

$$ydy = K_1 c dx. \quad (6)$$

Проинтегрировав (6), получим:

$$y^2 = 2K_1 cx + C_2. \quad (7)$$

Эти параболы также изображены на рисунке 2 слева от линии переключения.

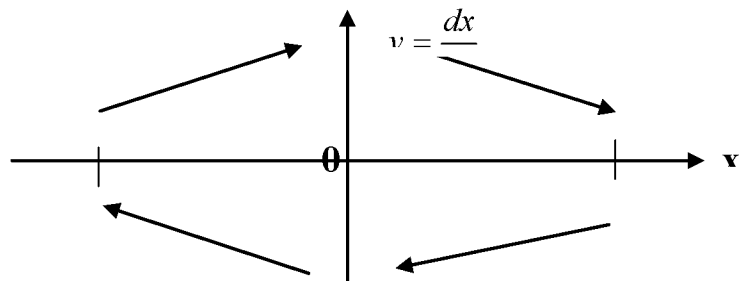


Рисунок 3 – Направление движения изображающей точки по фазовым траекториям

На отрезке линии переключения АВ фазовые траектории встречаются, упираясь в этот отрезок. Это можно расшифровать следующим образом.

Пусть процесс идет по фазовой траектории 1 (рисунок 4).

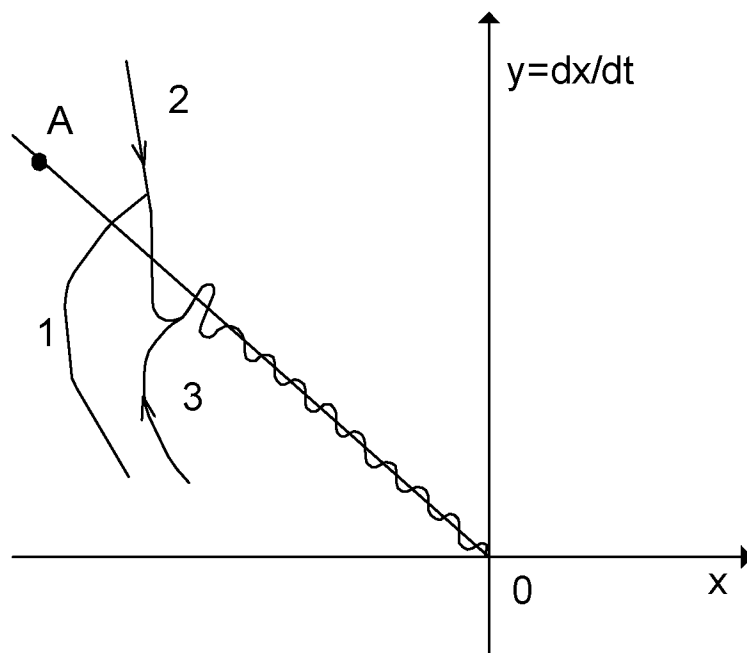


Рисунок 4 – Движение системы в скользящем режиме

Как только фазовая траектория пересечет линию переключения ОА, то движение будет происходить по фазовой траектории 2, которая вернет процесс к отрезку ОА. После пересечения линии переключения процесс движения будет происходить по фазовой траектории 3 и т.д.

В результате изображающая точка путем вибраций около линии переключения переместится к началу координат 0.

Такое движение соответствует переключениям РЭ с большой частотой. Теоретически частота переключения бесконечна, а амплитуда колебаний около линии переключения стремится к нулю.

Следовательно, теоретически изображающая точка скользит по линии переключения к началу координат – к равновесному состоянию. Подобный процесс называется скользящим процессом.

Найдем закон движения в скользящем процессе. На линии переключения, согласно (4), имеет место уравнение:

$$\frac{dx}{dt} + \frac{1}{K_{oc}} x = 0. \quad (8)$$

Решением этого уравнения является

$$x = x_0 e^{-\frac{1}{K_{oc}} t}, \quad (9)$$

где  $x = x_0$  при  $t = 0$  считается в момент попадания изображающей точки на линию скользящего процесса. Скользящий процесс происходит по экспоненциальному закону. При этом закон движения в скользящем процессе не зависит от параметров прямой цепи системы и определяется только коэффициентом обратной связи.

Например, при начальном положении точки  $M_0$  (рисунок 2) получим фазовую траекторию  $M_0 M_1 M_2 M_3$ , переходящую в скольжение по линии  $M_3 0$ . Такой фазовой траектории соответствует процесс во времени  $x(t)$ , изображенный на рисунке 5.

Положение концов отрезка скользящего процесса А и В на фазовой плоскости (рисунок 2) определяется следующим образом.

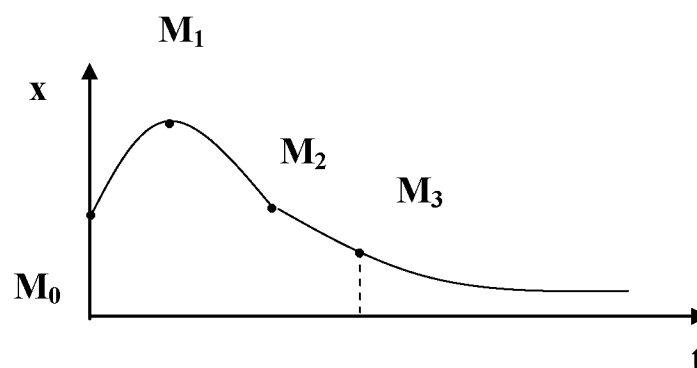


Рисунок 5

В этих точках касательные к параболам совпадают с линией переключения. Это условие, согласно (4), можно записать в виде:



$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{K_{oc}}. \quad (10)$$

Тогда из уравнения фазовых траекторий (3) получим для точек А и В соответственно условие (10) в виде:

$$-\frac{K_1 c}{y_A} = -\frac{1}{K_{oc}}, \quad y_A = K_1 \cdot c \cdot K_{oc},$$

$$\frac{K_1 c}{y_B} = -\frac{1}{K_{oc}}, \quad y_B = -K_1 \cdot c \cdot K_{oc}.$$

Следовательно, отрезок скользящего процесса АВ тем больше, чем больше коэффициенты усиления прямой цепи и обратной связи.

## **2 УКАЗАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Для заданного варианта параметров системы рассчитать и построить траекторию изображающей точки на фазовой плоскости.

Пункт 1 студенты выполняют до прихода в лабораторию.

2. С помощью программно-реализованных блоков системы моделирования MATLAB собрать исследуемую структурную схему и получить переходной процесс в системе в скользящем режиме.

3. Исследовать, при каких значениях параметров системы скользящий режим работы в системе нарушается, и в системе происходят автоколебания.

4. Сравнить экспериментальные и расчетные траектории изображающей точки на фазовой плоскости.

## **3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать структурную схему исследуемой системы, фазовые траектории изображающей точки (рассчитанные и экспериментальные), выводы по работе.

## **4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте понятие скользящего процесса.
2. Запишите уравнение движения изображающей точки в скользящем процессе.
3. Как влияют параметры прямой цепи системы на скользящий процесс?
4. Как влияют параметры обратной связи на скользящий процесс?

5. Сформулируйте правило для направления движения изображающей точки по фазовым траекториям.

Таблица 1 – Варианты задания

Варианты задания	Параметры			Начальные условия		Вид нелинейного элемента
	C	$K_1$	$K_{oc}$	$x(0)$	$x'(0)$	F(x)
1	2	3	4	5	6	7
1	$\pm 1$	2	0,1	+ 5	- 5	ИРХ
2	$\pm 2$	0,5	0,2	+10	- 10	ИРХ
3	$\pm 3$	0,2	0,5	+ 20	- 20	ИРХ
4	$\pm 1$	0,1	0,25	+ 30	- 30	ИРХ
5	$\pm 1$	2,5	0,1	+ 40	- 40	ИРХ
6	$\pm 2$	1	1	+ 10	- 10	ИРХ
7	$\pm 5$	2	0,5	+ 50	- 50	ИРХ
8	$\pm 4$	0,5	0,2	+ 60	- 60	ИРХ
9	$\pm 6$	0,2	0,5	+ 10	- 10	ИРХ
10	$\pm 10$	0,5	0,5	- 10	+ 10	ИРХ
11	$\pm 20$	0,1	0,2	- 20	+ 20	ИРХ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
12	$\pm 1$	2	0,1	- 30	+ 30	ИРХ
13	$\pm 2$	0,5	0,2	- 40	+ 40	ИРХ
14	$\pm 3$	0,2	0,2	- 50	+ 50	ИРХ
15	$\pm 4$	0,1	0,25	- 60	+ 60	ИРХ
16	$\pm 10$	0,2	0,5	+ 1	- 1	ИРХ
17	$\pm 20$	0,1	0,1	+ 2	- 2	ИРХ
18	$\pm 30$	0,5	0,1	+ 4	- 4	ИРХ
19	$\pm 40$	0,1	0,2	+ 10	- 10	ИРХ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Цель работы – познакомиться с пакетами расширений Fuzzy Logic Toolbox и Neural Networks Toolbox среды MATLAB; получить навыки построения систем управления на основе методов нечеткой логики; построить аппроксиматоры на основе нейросетей.

#### 1 Материальное обеспечение лабораторной работы

1.1 ПЭВМ.

1.2 Программа MATLAB.

#### 2 Содержание лабораторной работы

2.1 Освоение интерфейса пакета расширений Fuzzy Logic Toolbox, определение возможностей и ограничений.

2.2 Создание системы управления светофорного объекта на основе нечеткой логики.

2.3 Ознакомление с приложениями MATLABa, построенных на пакете расширений Neural Networks Toolbox.

2.4 Построение аппроксиматора на основе нейросетевой технологии.

#### 3 Общие положения

##### 3.1 Теоретические основы применения "нечеткой логикой" (Fuzzy logic)

Решение качественных или смешанных задач в настоящее время является наиболее сложным, т.к. необходимо решать задачи, не поддающиеся полностью или частично формализации для применения стандартной логики. Поэтому качественные задачи пока в основном решаются человеком, но есть уже и опыт решения их нейронными сетями или экспертными системами.

Управление техническими или иными объектами в большинстве своем являются задачами количественными. Аналитически управление объектом сводится к решению одного или системы дифференциальных уравнений.

Существуют специальные прикладные программы для моделирования динамических систем таких, как Visimm. При достаточно точном описании процесса системой уравнений ее целесообразно решать аналитическим или численным методом. Эффективно такие вычисления производятся в среде MathCAD, MATLAB.

Однако зачастую аналитическое описание объекта (математическая модель) или недостаточно верно, или решение носит сложный характер. В этих случаях прибегают к методам моделирования, анализа, построенных на основе нейросетей, нечеткой логики, генетических алгоритмах, то есть методах искусственного интеллекта (ИИ).

Нечеткая логика возникла как наиболее удобный способ построения систем управления метрополитенами и сложными технологическими процессами, а также нашла применение в бытовой электронике, диагностических и других экспертных системах. Несмотря на то, что математический аппарат нечеткой логики впервые был разработан в США, активное развитие данного метода началось в Японии, и новая волна вновь достигла США и Европы.

Термин fuzzy (англ. нечеткий, размытый - произносится 'фаззи') является ключевым понятием. Нечеткая логика является многозначной логикой, что позволяет определить промежуточные значения для таких общепринятых оценок, как да|нет, истинно|ложно, черное|белое и т.п. Выражения подобные таким, как "слегка тепло" или "довольно холодно" становится возможно формулировать математически и обрабатывать на компьютерах. Нечеткая логика появилась в 1965 в работах Лотфи А. Задэ (Lotfi A. Zadeh), профессора технических наук Калифорнийского университета в Беркли.

Рассмотрим базовые понятия "нечеткой логики". Самым главным понятием систем, основанных на нечеткой логике, является понятие нечеткого (под)множества.

*Нечеткое множество* - это такое множество, которое образуется путем введения обобщенного понятия принадлежности, т.е. расширения двухэлементного множества значений функции принадлежности  $\{0,1\}$  до отрезка  $[0,1]$ . Это означает, что переход от полной принадлежности объекта множеству к его полной непринадлежности происходит не скачком, как в обычных "четких" множествах, а плавно, постепенно, причем степень принадлежности элемента множеству выражается числом из интервала  $[0,1]$ .

Таким образом, нечеткое множество  $A = \{(x, \mu_A(x))\}$  определяется математически как совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов  $x$  множества  $X$  и соответствующих им степеней принадлежности  $\mu_A(x)$  или непосредственно в виде функции  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ .

*Функцией принадлежности (membership function)* называется функция, которая позволяет вычислить степень принадлежности произвольного элемента универсального множества к нечеткому множеству. Графическое представление функции принадлежности называется *термом*.

*Нечеткое число* - это нечеткое подмножество универсального множества действительных чисел, имеющее *нормальную* и *выпуклую* функцию принадлежности, то есть такую, что а) существует такое значение носителя, в котором функция принадлежности равна единице, а также б) при отступлении от своего максимума влево или вправо функция принадлежности убывает.

Понятие нечеткого множества - это попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. В основе этого понятия лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- 1) нечеткие множества описывают неопределенные понятия (быстрый бегун, горячая вода, жаркая погода);
- 2) нечеткие множества допускают возможность частичной принадлежности к ним (пятница - частично выходной день (укороченный), погода скорее жаркая);
- 3) степень принадлежности объекта к нечеткому множеству определяется соответствующим значением функции принадлежности на интервале  $[0,1]$ ;
- 4) функция принадлежности ставит в соответствие объекту (или логической переменной) значение степени его принадлежности к нечеткому множеству.

Для наглядности приведем функцию принадлежности (терм) множества молодых людей.

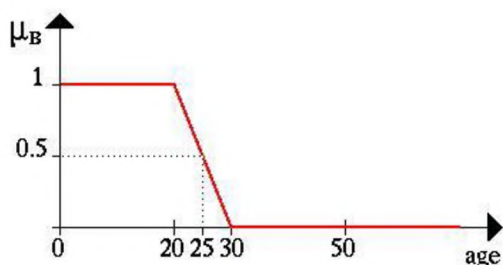


Рисунок 3.1 - Функция принадлежности  $\mu_A$  множества B

Из рисунка 3.1 видно, что 25-летние все еще молоды со степенью принадлежности 0,5.

Определим базовые операции (действия) над нечеткими множествами (числами). Аналогично действиям с обычными множествами нам потребуется определить пересечение, объединение и отрицание нечетких множеств. В своей самой первой работе по нечетким

множествам Л. А. Заде предложил оператор минимума для пересечения и оператор максимума для объединения двух нечетких множеств. Легко видеть, что эти операторы совпадают с обычными (четкими) объединением и пересечением, только рассматриваются степени принадлежности 0 и 1. Чтобы пояснить это, приведем несколько примеров. Пусть А – нечеткое число (интервал) от 5 до 8 и В – нечеткое число около 4, как показано на рисунке.

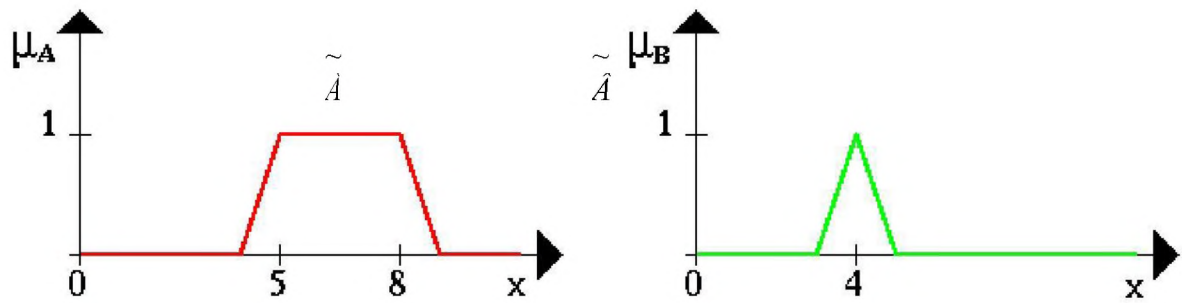


Рисунок 3.2 - Графическое представление двух нечетких чисел А и В

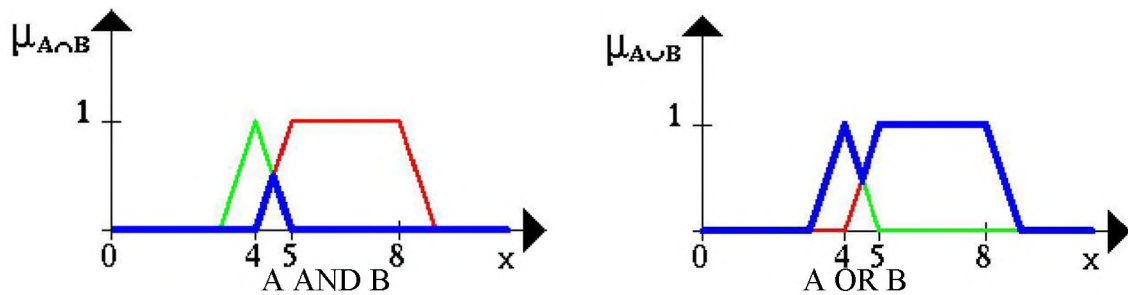


Рисунок 3.3 – Логические операции (AND, OR) с нечеткими числами А и В

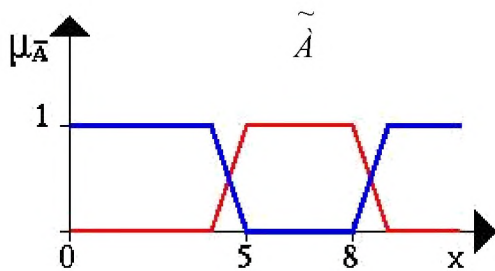


Рисунок 3.4 – Логическое отрицание (NOT) нечеткого числа  $A$

*Фаззификацией* (fuzzification) называется процедура преобразование "четкой" точки  $\tilde{O} \in (\tilde{O}_1, \dots, \tilde{O}_n) \in \tilde{O}$  в нечеткое множество числа  $A$  из  $X$ . Другими словами нахождение значений функции принадлежности нечеткого числа в заданной точке. На этом этапе происходит установление соответствия между численным значением входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. Так, *фаззификация* числа 25 (рисунок 3.1) дает нам значение 0,5.

*Дефаззификацией* (defuzzification) называется процедура преобразования нечеткого множества в четкое число.

В теории нечетких множеств процедура дефаззификации аналогична нахождению характеристик положения (математического ожидания, моды, медианы) случайных величин в теории вероятности. Простейшим способом выполнения процедуры дефаззификации является выбор четкого числа, соответствующего максимуму функции принадлежности. Однако пригодность этого способа ограничивается лишь одноэкстремальными функциями принадлежности. Для многоэкстремальных функций принадлежности в Fuzzy Logic Toolbox запрограммированы такие методы дефаззификации:

- Centroid - центр тяжести;
- Bisector - медиана;
- LOM (Largest Of Maximums) - наибольший из максимумов;
- SOM (Smallest Of Maximums) - наименьший из максимумов;
- Mom (Mean Of Maximums) - центр максимумов.

*Нечеткой базой знаний* (fuzzy knowledge base) о влиянии факторов  $X=x_1, \dots, x_n$  на значение параметра  $Y$  называется совокупность логических высказываний типа: ЕСЛИ ( $x_1 \in \alpha_1$ ) И ( $x_2 \in \alpha_2$ ), ... И ( $x_n \in \alpha_n$ ) ИЛИ ( $x_1 \in \alpha_1$ ), ИЛИ ( $x_2 \in \alpha_2$ ) ..., ИЛИ ( $x_k \in \alpha_k$ ), ТО  $y_i \in \alpha_j$ ,

где  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  - нечеткий терм, которым оцениваются входные переменные  $x_1, \dots, x_n$ ;

$\alpha_j$  - нечеткий терм, которым оцениваются выходные переменные  $y_1, \dots, y_n$ . Графически систему на основе нечеткой логики можно представить в виде блоков (рисунок 3.5).

Рассмотрим разработку подобных систем в среде MATLAB.

MATLAB – матричная лаборатория – наиболее развитая система программирования для научно-технических расчетов, дополненная к настоящему времени несколькими десятками более частных приложений, относящихся к вычислительной математике, обработке информации, конструированию электронных приборов, экономике и ряду других разделов прикладной науки.

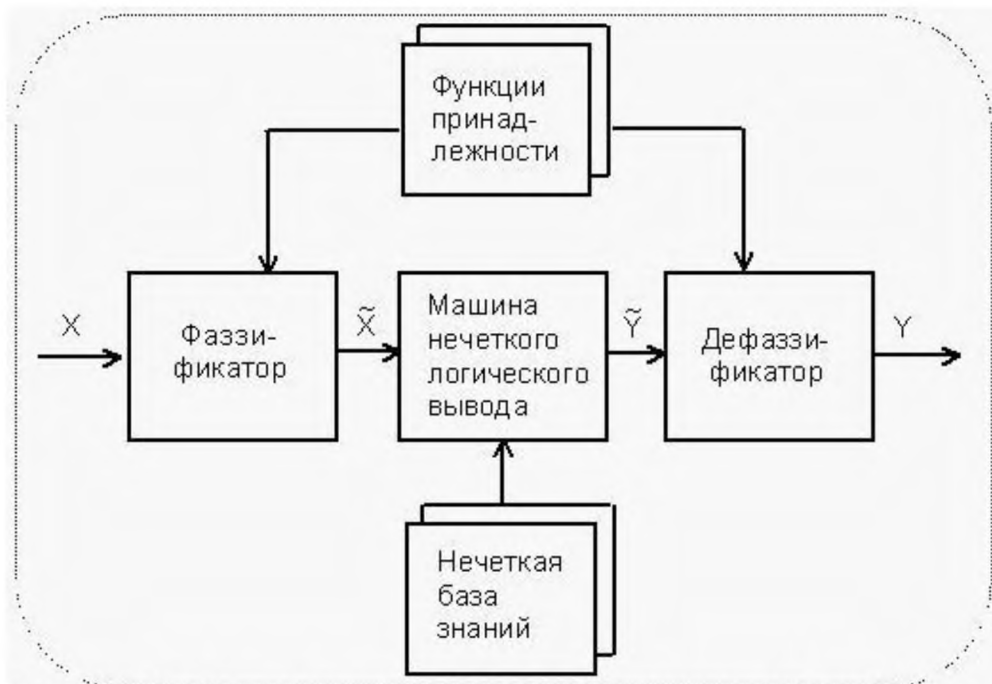


Рисунок 3.5 - Структурная схема системы, использующей "нечеткую логику"

$X$  - входной четкий вектор;  $\tilde{O}$  - вектор нечетких множеств, соответствующий

входному вектору  $X$ ;  $\tilde{Y}$  - результат логического вывода в виде вектора нечетких множеств;  $Y$  - выходной четкий вектор.

MATLAB – система программирования высокого уровня, работающая как интерпретатор и включающая большой набор инструкций (команд) для выполнения самых разнообразных вычислений, задания структур данных и графического представления информации. Команды эти разбиты на тематические группы, расположенные в различных директориях системы.

Fuzzy Logic Toolbox - это пакет прикладных программ, входящих в состав среды MATLAB. Он позволяет создавать системы нечеткого логического вывода и нечеткой классификации в рамках среды MATLAB, с возможностью их интегрирования в Simulink.

Базовым понятием Fuzzy Logic Toolbox является FIS-структура - система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System). FIS-структура содержит все необходимые данные для реализации функционального отображения “входы-выходы” на основе нечеткого логического вывода согласно схеме, приведенной на рисунке 3.5.

Fuzzy Logic Toolbox содержит следующие категории программных инструментов:

- функции;
- интерактивные модули с графическим пользовательским интерфейсом (с GUI);
- блоки для пакета Simulink;
- демонстрационные примеры.

Модуль fuzzy позволяет строить нечеткие системы двух типов - Мамдани и Сугэно. В системах типа Мамдани база знаний состоит из правил вида “Если  $x_1$ =низкий и  $x_2$ =средний, то  $y$ =высокий”. В системах типа Сугэно база знаний состоит из правил вида “Если  $x_1$ =низкий и  $x_2$ =средний, то  $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2$ ”. Таким образом, основное отличие между системами Мамдани и Сугэно заключается в разных способах задания значений выходной переменной в правилах, образующих базу знаний. В системах ти-

па Мамдани значения выходной переменной задаются нечеткими термами, в системах типа Сугэно - как линейная комбинация входных переменных.

### 3.2 Теоретические основы нейросетевых технологий

Искусственные нейронные сети индуцированы биологией, так как они состоят из элементов, функциональные возможности которых аналогичны большинству элементарных функций биологического нейрона. Эти элементы затем организуются по способу, который может соответствовать (или не соответствовать) анатомии мозга. Несмотря на такое поверхностное сходство, искусственные нейронные сети демонстрируют удивительное число свойств, присущих мозгу. Например, они обучаются на основе опыта, обобщают знание и извлекают существенные свойства из поступающей информации.

Искусственные нейронные сети могут менять свое поведение в зависимости от внешней среды. Этот фактор в большей степени, чем любой другой, ответствен за тот интерес, который они вызывают. После предъявления входных сигналов (возможно, вместе с требуемыми выходами) они самонастраиваются, чтобы обеспечивать требуемую реакцию.

Искусственный нейрон имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, аналогичный синаптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. На рисунке 3.6 представлена модель, реализующая эту идею. Хотя сетевые парадигмы весьма разнообразны, в основе почти всех их лежит эта конфигурация. Здесь множество входных сигналов, обозначенных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , поступает на искусственный нейрон. Эти входные сигналы, в совокупности обозначаемые вектором  $\mathbf{X}$ , соответствуют сигналам, приходящим в синапсы биологического нейрона. Каждый сигнал умножается на соответствующий вес  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , и поступает на суммирующий блок, обозначенный  $\Sigma$ . Каждый вес соответствует «силе» одной биологической синаптической связи, (множество весов в совокупности обозначается вектором  $\mathbf{W}$ ). Суммирующий блок, соответствующий телу биологического элемента, складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход, который мы будем называть NET. В векторных обозначениях это может быть компактно записано следующим образом:

$$NET = \mathbf{XW}.$$

Рисунок 3.6 - Искусственный нейрон

Сигнал NET далее, как правило, преобразуется активационной функцией  $F$  и дает выходной нейронный сигнал OUT. Активационная функция может быть обычной линейной функцией

$$OUT = K(NET),$$

где  $K$  – постоянная, пороговой функции;

$$OUT = 1, \text{ если } NET > T,$$

$$OUT = 0 \text{ в остальных случаях,}$$

где  $T$  – некоторая постоянная пороговая величина, или же функцией, более точно моделирующей нелинейную передаточную характеристику биологического нейрона и представляющей нейронной сети большие возможности.

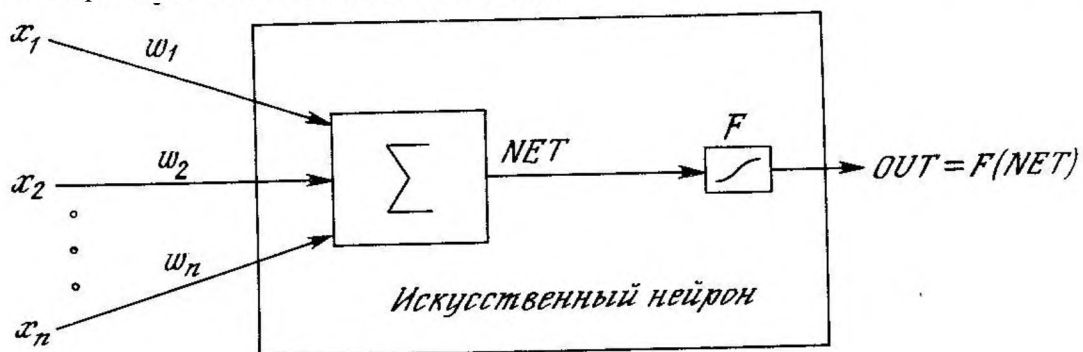




Рисунок 3.7- Искусственный нейрон с активационной функцией

На рисунке 3.7 блок, обозначенный  $F$ , принимает сигнал NET и выдает сигнал OUT. Если блок  $F$  сужает диапазон изменения величины NET так, что при любых значениях NET значения OUT принадлежат некоторому конечному интервалу, то  $F$  называется «сжимающей» функцией. В качестве «сжимающей» функции часто используется логистическая или «сигмоидальная» (S-образная) функция. Эта функция математически выражается как  $F(x) = 1/(1 + e^{-x})$ . Таким образом,

$$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}$$

По аналогии с электронными системами активационную функцию можно считать нелинейной усилительной характеристикой искусственного нейрона. Коэффициент усиления вычисляется как отношение приращения величины OUT к вызвавшему его небольшому приращению величины NET.

Признаки, при наличии которых задачу целесообразно решать с применением нейросетевых технологий:

- отсутствие алгоритма и математической модели решения задачи;
- имеются данные экспериментальных исследований;
- проблема характеризуется большими объемами входной информации, причем данные носят вероятностный или нечеткий характер, зашумлены, искажены или противоречивы.

Любая нейронная сеть может быть представлена в виде схемы, (рисунок 3.8).

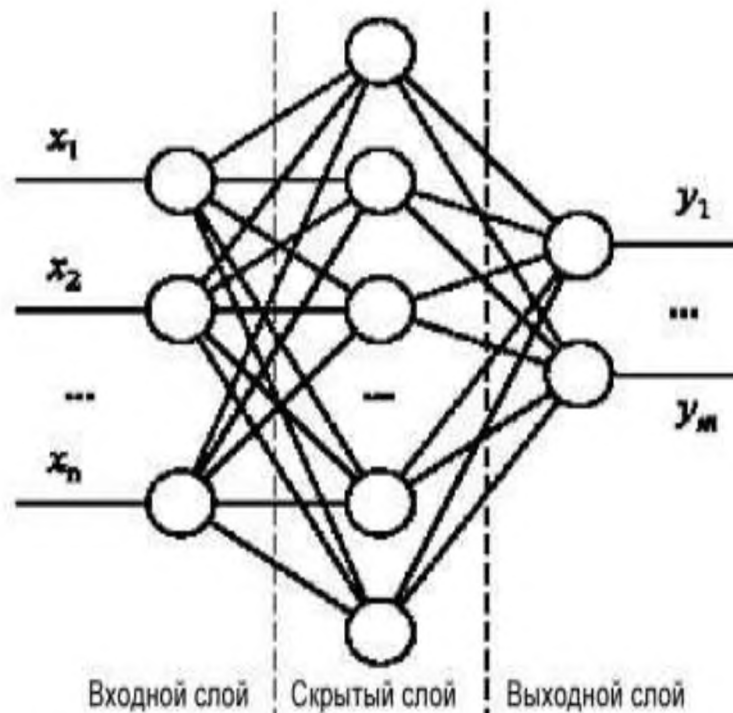
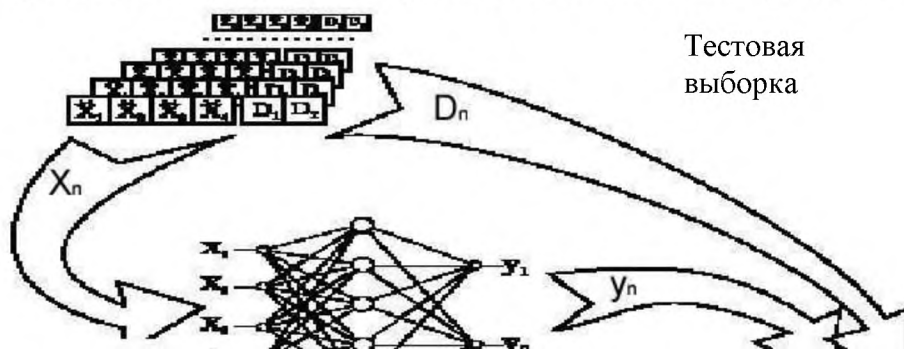


Рисунок 3.8 – Структура трехслойной нейронной сети

После построения сети требуется ее обучение. Схема обучения представлена на рисунке 3.9.



Обучающая  
выборка

Рисунок 3.9 – Структура обучения нейронной сети  
Методы (алгоритмы) обучения НС делятся на два класса:

- обучение с учителем - сети предъявляются значения как входных, так и желательных выходных сигналов, и она по некоторому внутреннему алгоритму подстраивает веса своих синаптических связей.
- обучение без учителя - выходы НС формируются самостоятельно, а веса изменяются по алгоритму, учитывающему только входные и производные от них сигналы.

После обучения сеть готова к работе, то есть решения задач классификации, аппроксимации и др.

#### 4 Выполнение лабораторной работы

4.1. Создания системы управления светофорного объекта. Обычно для таких задач выбирают систему типа Мамдани.

*Постановка задачи.* Система управления должна регулировать время работы светофора в режиме зеленого света в зависимости от количества подъезжающих к перекрестку машин, (рисунок 3.10).

*Решение задачи.* Для работы нечеткого светофора на перекрестке улиц Север-Юг (СЮ) и Запад-Восток (ЗВ) необходимо установить 8 датчиков (рисунок 3.10), которые считают проехавшие мимо них машины.

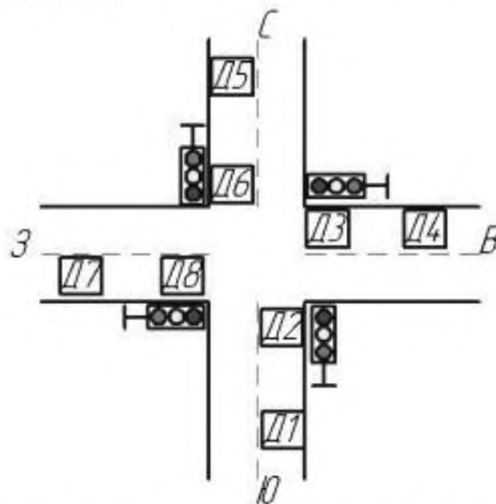


Рисунок 3.10 - Расположение датчиков на перекрестке Светофор использует разности показаний четырех пар датчиков: (Д1-Д2), (Д3-Д4), (Д5-Д6) и (Д7-Д8). Таким образом, если для улицы СЮ горит зеленый свет, машины проезжают перекресток и показания двух пар датчиков равны:  $Д1=Д2$ ,  $Д5=Д6$ , а, следовательно, их разность равна нулю. В это же время на улице ЗВ перед светофором останавливаются машины, которые успели проехать только Д4 и Д7. В результате можно расчи-

тать суммарное количество автомобилей на этой улице следующим образом:  $(Д4-Д3)+(Д7-Д8)=(Д4-0)+(Д7-0)=Д4+Д7$ .

Поскольку работа светофора зависит от числа машин на обеих улицах и текущего времени зеленого света, для нашей системы предлагается использовать 3 входа:

- число машин на улице СЮ по окончании очередного цикла (интенсивность СЮ);
- число машин на улице ЗВ по окончании цикла (интенсивность ЗВ);
- время зеленого света нечеткого светофора, сек. (фаза светофора).

*Шаг 1.* Для загрузки основного fis-редактора напечатаем слова fuzzy в командной строке MATLAB. После этого откроется нового графическое окно, показанное на рисунке 3.11.

*Шаг 2.* Добавим вторую и третью входную переменную. Для этого в меню Edit выбираем команду Add input.

*Шаг 3.* Переименуем первую входную переменную. Для этого сделаем один щелчок левой кнопкой мыши на блоке input1, введем новое обозначение **фаза- светофора** в поле редактирования имени текущей переменной и нажмем Enter>.

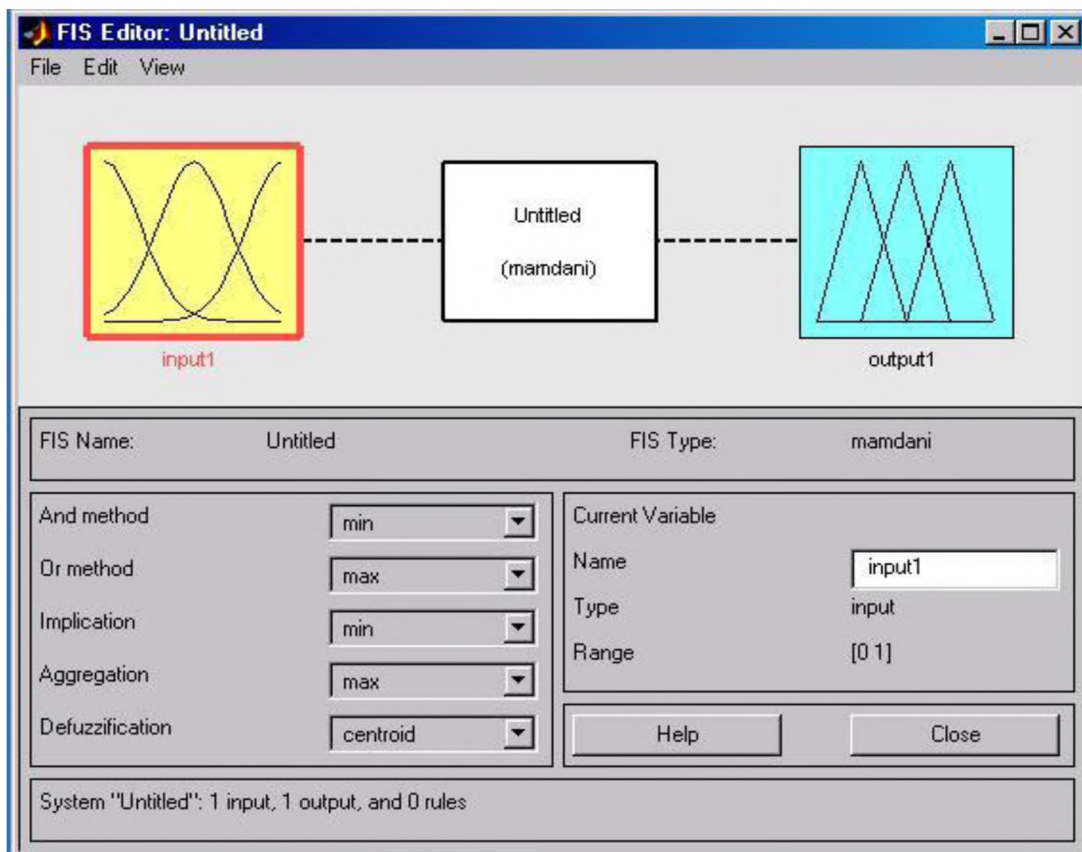


Рисунок 3.11 - Окно редактора FIS-Editor

*Шаг 4.* Переименуем остальные входные переменные. Для этого сделаем один щелчок левой кнопкой мыши на блоке input2, введем новое обозначение **интенсивность СЮ** в поле редактирования имени текущей переменной и нажмем <Enter>. Аналогично переименовываем третью переменную.

*Шаг 5.* Переименуем выходную переменную. Для этого сделаем один щелчок левой кнопкой мыши на блоке output1, введем новое обозначение **изменить-фазу** в поле редактирования имени текущей переменной и нажмем <Enter>.

*Шаг 6.* Зададим имя системы. Для этого в меню File выбираем в подменю Export команду To disk и вводим имя файла, например, svetofor.

*Шаг 7.* Перейдем в редактор функций принадлежности. Для этого сделаем двойной щелчок левой кнопкой мыши на блоке **фаза-светофора**.

*Шаг 8.* Зададим диапазон изменения переменной **фаза-светофора**. Для этого напечатаем 0 50 в поле Range (рисунок 3.12) и нажмем <Enter>.

*Шаг 9.* Зададим функции принадлежности переменной **фаза-светофора**. Для лингвистической оценки этой переменной будем использовать 3 термина с трапециидальными функциями принадлежности. Для этого в меню Edit выберем команду Add MFs... В результате появится диалоговое окно выбора типа и количества функций принадлежности. По умолчанию, это 3 термина с треугольными функциями принадлежности. Поэтому просто нажимаем <Enter>.

*Шаг 10.* Зададим наименования термов переменной **фаза-светофора**. Для этого делаем один щелчок левой кнопкой мыши по графику первой функции принадлежности (рисунок 3.12). Затем вводим наименование термина, например, малое, в поле Name и нажмем <Enter>. Затем делаем один щелчок левой кнопкой мыши по графику второй функции принадлежности и вводим наименование термина, например, Среднее, в поле Name и нажмем <Enter>. Еще раз делаем один щелчок левой кнопкой мыши по графику третьей функции принадлежности и вводим наименование термина, например, Высокое, в поле Name и нажмем <Enter>. В результате получим графическое окно, изображенное на рисунке 3.12.

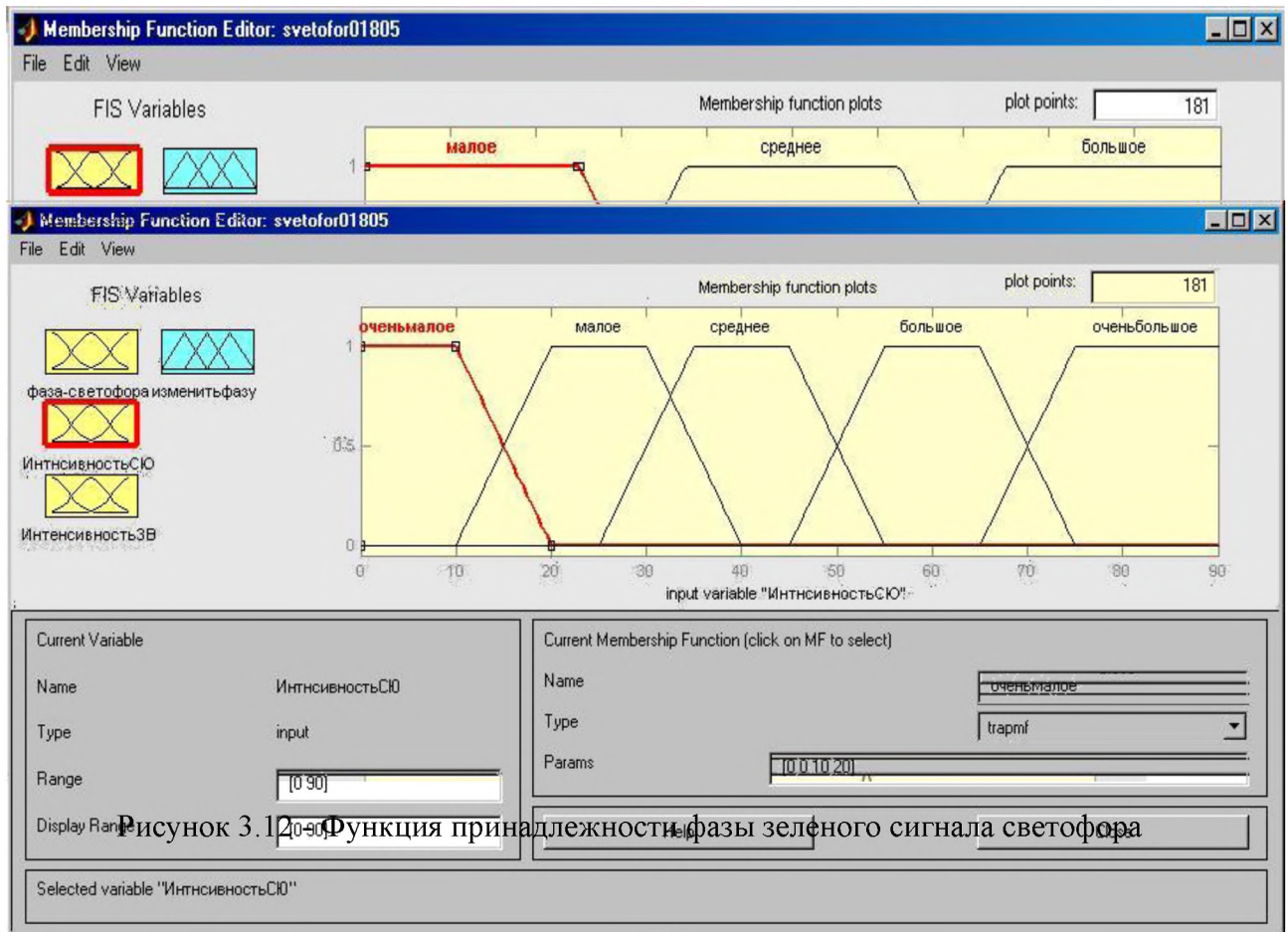


Рисунок 3.12. Функция принадлежности фазы зеленого сигнала светофора

Рисунок 3.13 - Функция принадлежности интенсивности движения по направлению СЮ

*Шаг 11.* Зададим функции принадлежности переменной **интенсивность**. Для лингвистической оценки этой переменной будем использовать 5 термов с трапециидальными функциями принадлежности. Для этого активизируем переменную **интенсивность** с помощью щелчка левой кнопки мыши на блоке **интенсивность**. Зададим диапазон изменения переменной **интенсивность**. Для этого напечатаем 0 90 в поле Range (рисунке 3.13) и нажмем <Enter>. Затем в меню Edit выберем команду Add MFs.... В появившемся диалоговом окне выбираем тип функции принадлежности trapezmf в поле MF type и 5 термов в поле Number of MFs. После этого нажимаем <Enter>.

*Шаг 12.* По аналогии с шагом 10 зададим следующие наименования термов переменной **интенсивность ВЗ**: Очень малое, малое, среднее, большое, очень большое.

*Шаг 13.* Зададим функции принадлежности переменной **изменить фазу**. Для лингвистической оценки этой переменной будем использовать 3 терма с гауссовской функциями принадлежности. Для этого активизируем переменную **изменить-фазу** с помощью щелчка левой кнопки мыши на блоке **изменить-фазу**. Зададим диапазон изменения переменной **изменить-фазу**. Для этого напечатаем -20 20 в поле Range (см. рисунке 3.14) и нажмем <Enter>. Затем в меню Edit выберем команду Add MFs.... В появившемся диалоговом окне выберем 3 термов в поле Number of MFs. После этого нажимаем <Enter>.

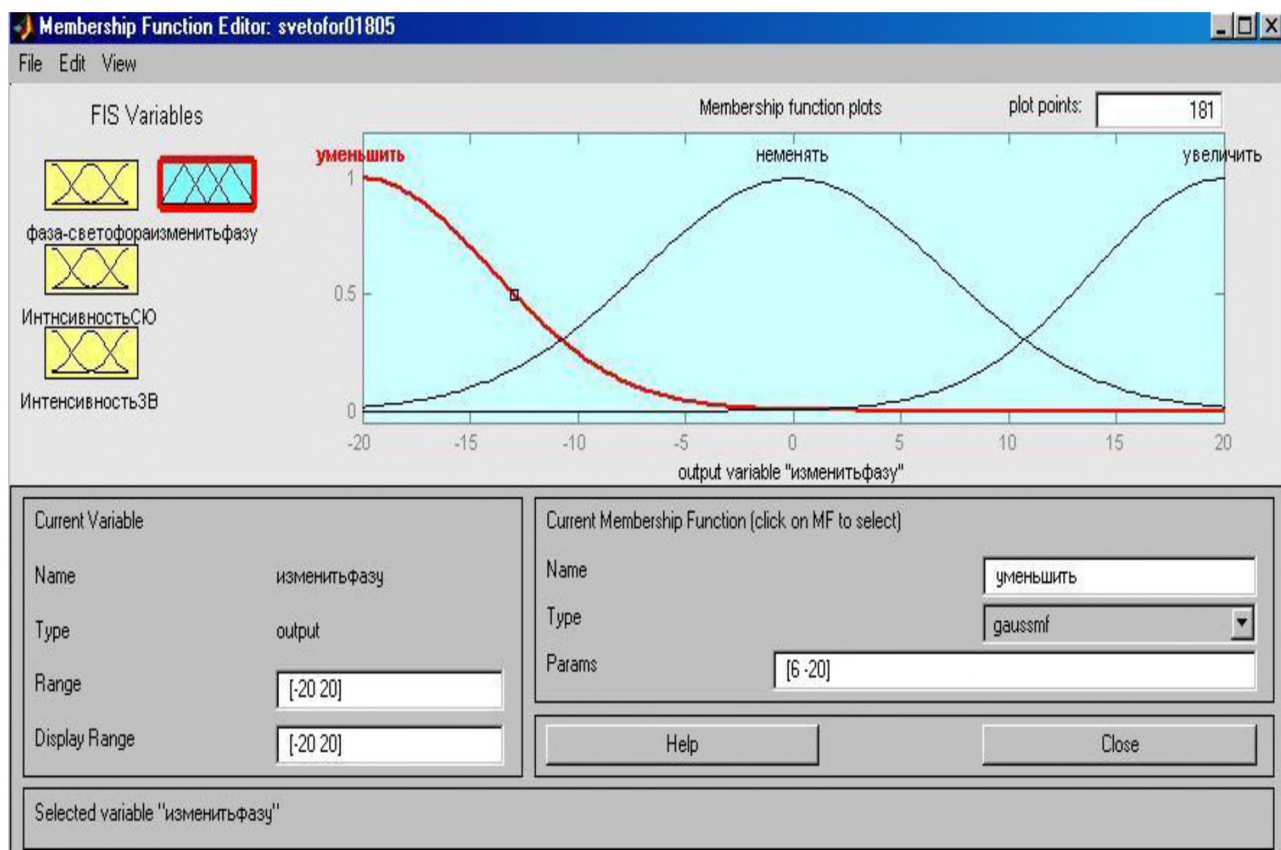


Рисунок 3.14 - Функция принадлежности выхода системы (изменение фазы зеленого сигнала светофора, сек.)

*Шаг 14.* По аналогии с шагом 10 зададим следующие наименования термов переменной у: уменьшить, не менять, Увеличить. В результате получим графическое окно, изображенное на рисунок 3.14.

*Шаг 15.* Перейдем в редактор базы знаний RuleEditor. Для этого выберем в меню Edit, команду Edit rules....

*Шаг 16.* На основе теоретических и экспериментальных данных о работе светофорных объектов сформулируем правила работы системы:

Если время зеленого света на улице СЮ=большое, & число машин на улице СЮ=малое, & число машин на улице ЗВ=большое, ТО время зеленого света = уменьшить.

Аналогично формулируем остальные правила. Число правил должно быть достаточным для эффективной работы системы в заданных условиях. Для нашей задачи это количество составляет 50 правил рисунок 3.15.

Для ввода правила необходимо выбрать в меню соответствующую комбинацию термов и нажать кнопку Add rule. На рис. 3.15. изображено окно редактора базы знаний после ввода всех девяти правил. Число, приведенное в скобках в конце каждого правила представляет собой весовым коэффициент соответствующего правила.

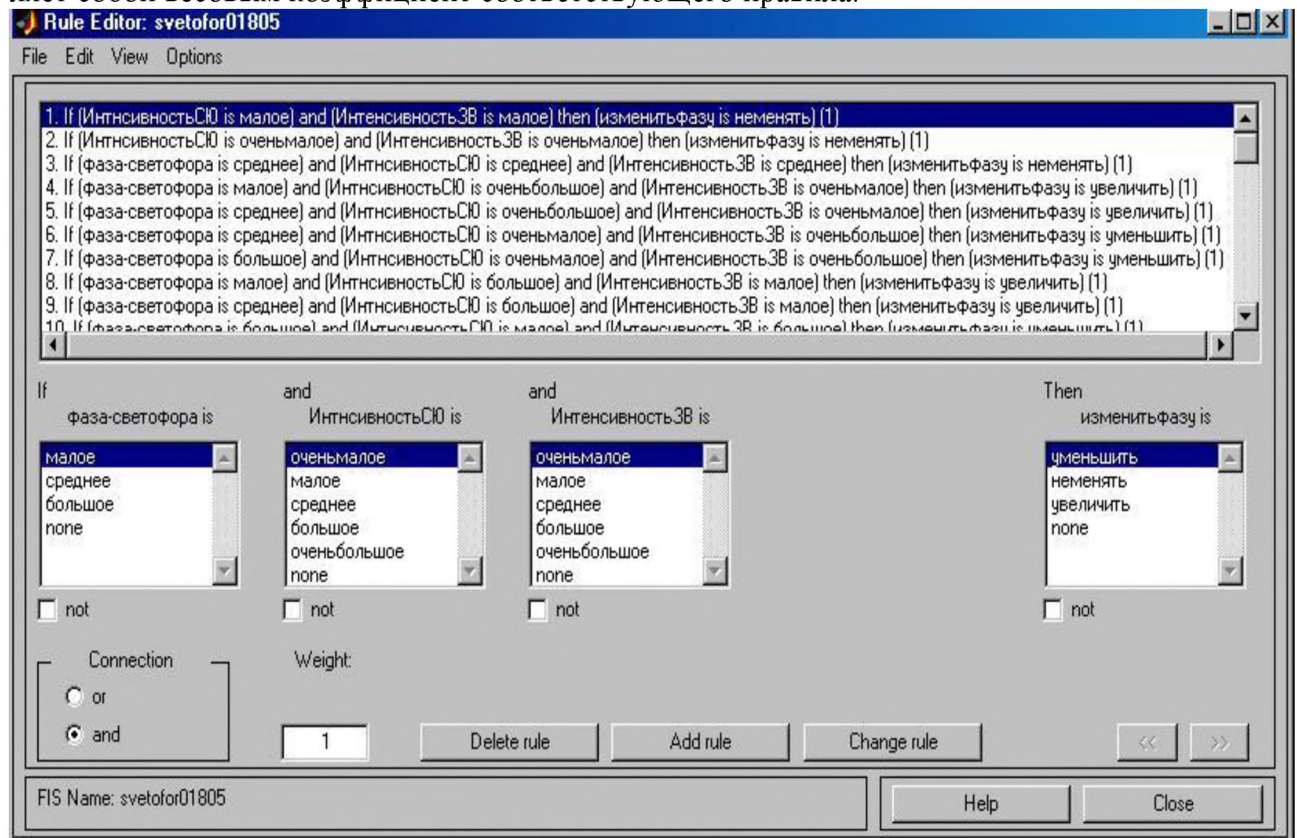


Рисунок 3.15 – Редактор базы логических правил

*Шаг 17.* Сохраним созданную систему. Для этого в меню File выбираем в подменю Export команду To disk.

На рисунке 3.16 приведено окно визуализации нечеткого логического вывода. Это окно ак-

тивизируется командой View rules... меню View. В поле Input указываются значения входных переменных, для которых выполняется логический вывод.

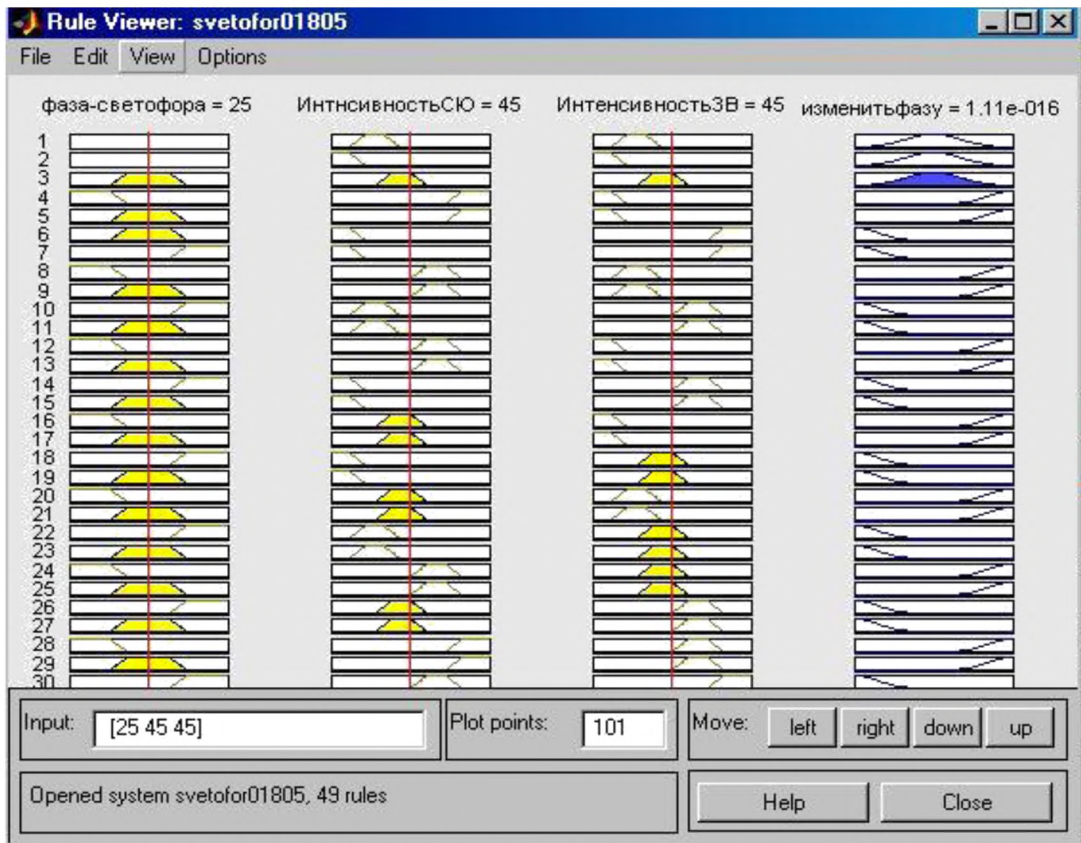


Рисунок 3.16 – Просмотр логических правил в браузере FIS редакторе

На рисунке 3.17 приведена поверхность “входы-выход”, соответствующая синтезированной нечеткой системе. Для вывода этого окна необходимо использовать команду View surface... меню View.

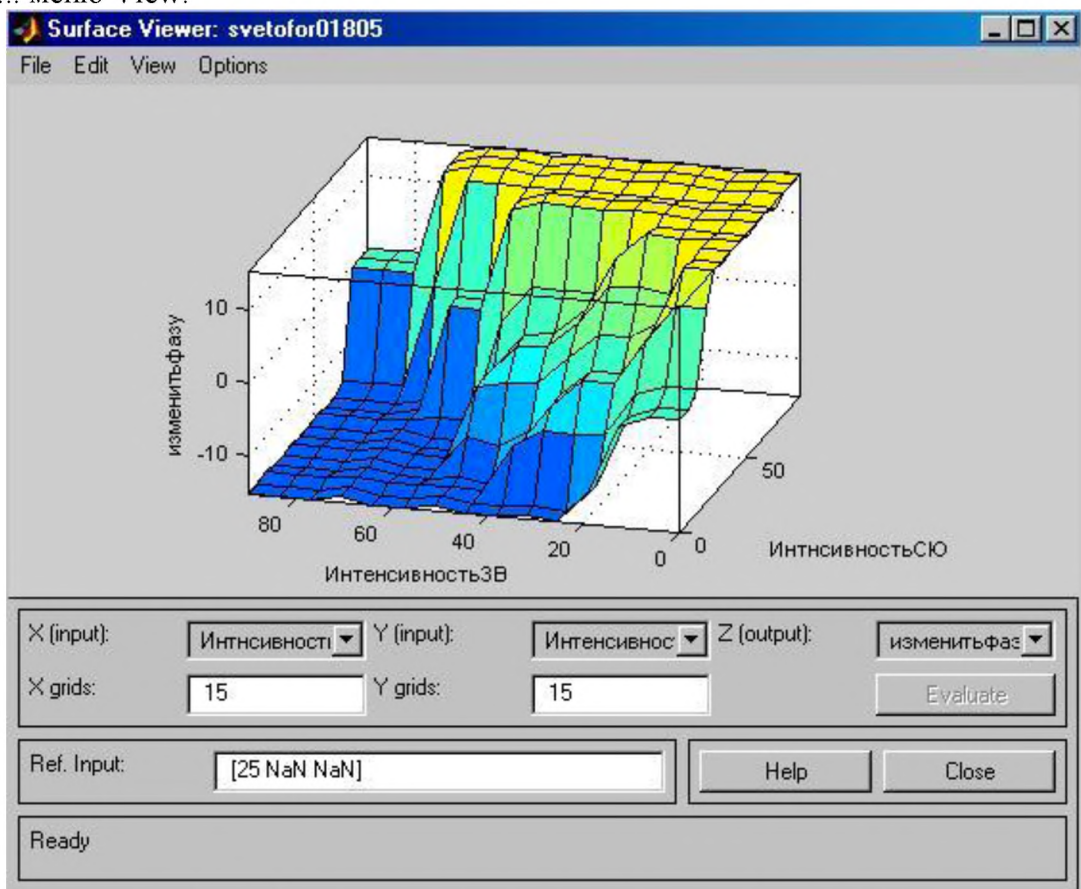


Рисунок 3.17 – Характеристика нечеткого регулятора по параметрам интенсивность движения по направлениям СЮ - ВЗ





## 4.2 Ознакомление с приложениями MATLABa построенных на пакете расширений Neural Networks Toolbox

Ознакомьтесь с демонстрационными примерами использования пакета Neural Networks Toolbox. В окне Редактор(Editor) выберите в списке демонстрации, затем инструменты (instrument), далее Neural Networks Toolbox.

### 4.3 Построение нейросетевого аппроксиматора

1 Создайте новый m-файл, через меню файл(File). Введите код нейросети по аппроксимации функции:

```
%определение функций
time = 1:0.01:2.5;
X = sin(sin(time).*time*10); P
= con2seq(X);
T = con2seq(2*[0 X(1:(end-1))] + X); %графическое
представление исходных сигналов
plot(time,cat(2,P{:}),time,cat(2,T{:}),'--'); title('Input and
Target Signals');
xlabel('Time');
legend({'Input','Target'});
%создание нейросети
net = newlin([-3 3],1,[0 1],0.1); %обуче-
ние сети и вывод результата
[net,Y,E,Pf]=adapt(net,P,T);
plot(time,cat(2,Y{:}),'b', ...
time,cat(2,T{:}),'r', ...
time,cat(2,E{:}),'g',[1 2.5],[0 0],'k'); le-
gend({'Output','Target','Error'});
%обучение сети и вывод результата
[net,Y,E,Pf]=adapt(net,P,T);
plot(time,cat(2,Y{:}),'b', ...
time,cat(2,T{:}),'r', ...
time,cat(2,E{:}),'g',[1 2.5],[0 0],'k'); le-
gend({'Output','Target','Error'});
```

2 Сохраните файл-сценарий с именем на test\_NN1. Запустите на выполнение данный файл.

#### *Контрольные вопросы*

- 1 Структура интерфейса пакета Fuzzy Logic Toolbox.
- 2 Принципы построения систем моделирования и экспертных систем на основе нечеткой логики в пакете Fuzzy Logic Toolbox.
- 3 Этапы построения нечетких регуляторов.
- 4 Принципы построения базы правил нечетких систем.
- 5 Принципы построения систем на базе нейросетей.
- 6 Структура, виды нейросетей, сферы назначения.
- 7 Порядок построения нейросетевого аппроксиматора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ

Цель работы – познакомиться с пакетами расширений Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ANFIS (адаптивная нейро-нечеткая система) среды MATLAB; получить навыки построения систем прогнозирования на основе нейро-нечетких систем.

#### 1 Материальное обеспечение лабораторной работы

##### 1.1 ПЭВМ.

##### 1.2 Программа MATLAB.

#### 2 Содержание лабораторной работы

##### 2.1 Освоение интерфейса пакета расширений ANFIS, определение возможностей и ограничений.

##### 2.2 Ознакомление с приложениями MATLAB, построенными в пакете расширений ANFIS.

##### 2.3 Создание системы прогнозирования на основе ANFIS.

#### 3 Общие положения

Основным компонентом рассмотренных ранее средств системы MATLAB в рамках пакета Fuzzy Logic Toolbox является нечеткая база (знаний) правил, которая занимает центральное место в процедурах нечеткого вывода. В то же время существуют целые классы прикладных задач, в которых выявление и построение правил невозможно или связано с серьезными трудностями концептуального характера. К таким задачам относятся задачи распознавания образов, экстраполяции и интерполяции функциональных зависимостей, классификации и прогнозирования, нелинейного и ситуационного управления, а также интел-лектуального анализа данных (Data Mining).

Общей особенностью подобных задач является существование некоторой зависимости или отношения, связывающего входные и выходные переменные модели системы, представляемой в форме так называемого "черного ящика". При этом выявление и определение данной зависимости в явном теоретико-множественном или аналитическом виде не представляется возможным либо по причине недостатка информации о моделируемой проблемной области, либо сложности учета многообразия факторов, оказывающих влияние на характер данной взаимосвязи.

Для конструктивного решения подобных задач разработан специальный математический аппарат, получивший название нейронных сетей. Достоинством моделей, построенных на основе нейронных сетей, является возможность получения новой информации о проблемной области в форме некоторого прогноза. При этом построение и настройка нейронных сетей осуществляется посредством их обучения на основе имеющейся и доступной информации.

Недостатком нейронных сетей является представление знаний о проблемной области в специальном виде, которое может существенно отличаться от возможной содержательной интерпретации существующих взаимосвязей и отношений.

Нечеткие нейронные сети или гибридные сети по замыслу их разработчиков призваны объединить в себе достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны, для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом

для системных аналитиков. В последнее время аппарат гибридных сетей повсеместно признается специалистами как один из наиболее перспективных для решения слабо или плохо структурированных задач прикладного системного анализа.

Система MATLAB имеет в своем составе ANFIS-редактор. ANFIS является аббревиатурой Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – (адаптивная нейро-нечеткая система). ANFIS-редактор позволяет автоматически синтезировать из экспериментальных данных нейро-нечеткие сети. Нейро-нечеткую сеть можно рассматривать как одну из разновидностей систем нечеткого логического вывода типа Сугэно. При этом функции принадлежности синтезированных систем настроены (обучены) так, чтобы минимизировать отклонения между результатами нечеткого моделирования и экспериментальными данными. Применяя эту систему можно эффективно разрабатывать системы прогнозирования.

Внешний вид ANFIS-редактора представлен на рисунок 4.1.

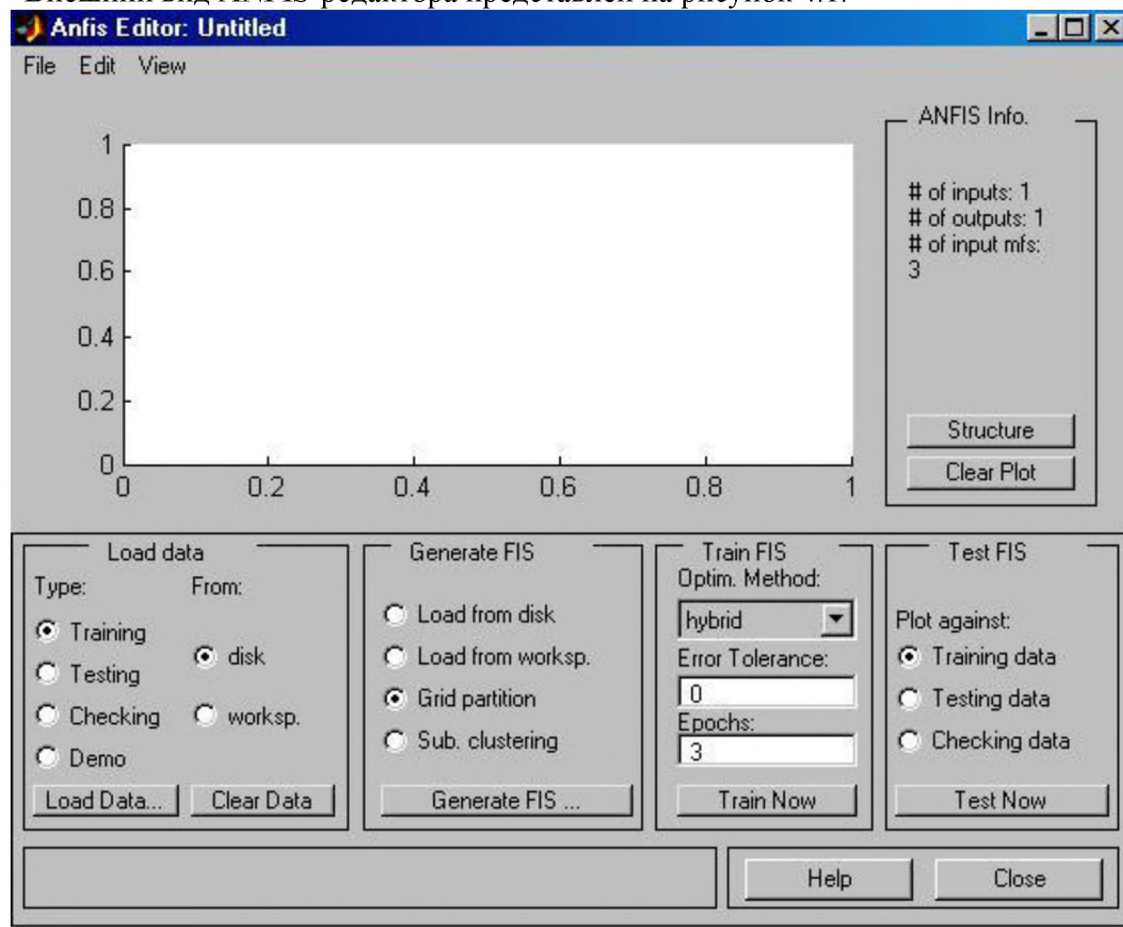


Рисунок 4.1 - ANFIS-редактор в среде MATLAB

## 4 Выполнение лабораторной работы

### 4.1 Освоение интерфейса ANFIS-редактора.

1 Запустить MATLAB.

2 Загрузить ANFIS-редактор с помощью команды `anfisedit`.

В результате выполнения этой команды появится графическое окно, изображенное на рисунке 4.1.

3 Изучить меню и области интерфейса редактора ANFIS.

### 4.2 Ознакомление с демонстрационными примерами MATLAB, построенными в пакете расширений Fuzzy Logic

1. Ознакомьтесь с демонстрационными примерами использования пакета **Fuzzy Logic**. В окне **Редактор (Editor)** выберите в списке **демонстрации**, затем **инструменты (instrument)**, далее **Fuzzy Logic**.

#### 4.3 Проектирование с системы прогнозирования

1. Загрузить ANFIS-редактор с помощью команды **anfisedit**. Проектирование систем прогнозирования производится в несколько этапов:

- загрузка данных с диска (обучающая выборка);
- генерирование структуры нечеткой системы (FIS);
- обучение нейросети системы;
- тестирование и дообучение системы прогнозирования.

2 Загрузить обучающую выборку через область **загрузка данных (Load data)**, файл **anfis1.dat**.

3 Сохранить созданную систему. Для этого в меню File выбираем в подменю Export команду To disk.

4 Произвести генерирование нечеткой (FIS) системы через область **генерация нечеткой структуры (Generate FIS)**. Необходимо выбрать число термов входных переменных, их вид, а также тип выходной переменной.

5 Произвести обучение нейросети гибридной системы, при этом нужно выбрать метод обучения, ошибку обучения и количество эпох при обучении. Первые два параметра подбираются по результатам обучения сети, а количество эпох должно быть достаточными для обучения сети с заданными параметрам. Следует начинать с 50 эпох. В дальнейшем увеличивают количество эпох до величины, при которой ошибка обучения не изменяется.

6 Просмотреть построенную структуру системы, используя область **свойств системы (ANFIS info)**.

7. Изучить правила нечеткой системы прогнозирования и кривую прогноза через меню (**edit** и **view**).

8. Произвести анализ полученной системы и сделать выводы.

#### *Контрольные вопросы*

- 1 Гибридные нейро-нечеткие системы, назначение, сферы применения.
- 2 Структура интерфейса Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Fuzzy Logic Toolbox.
- 3 Принципы построения систем прогнозирования в пакете Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Fuzzy Logic Toolbox.
- 4 Этапы построения гибридных систем и их тестирование.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Дьяконов, И.Абраменкова, В.Круглов. MATLAB с пакетами расширений под ред. Проф. В.П. Дьяконова. – М.: Нолидж. – 2001. – 880с.
2. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: Специальный справочник – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
3. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Питербург, 2003. – 736 с.
5. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003. – 448 с.
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. -312 с.
7. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB. – М.: Диалог - МИФИ, 2004. – 720 с.
8. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. - М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
9. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) [Электронный ресурс]: Фирма The Mathworks, Inc. (USA) – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
10. [www.matlab.ru](http://www.matlab.ru) [Электронный ресурс]: Консультационный Центр MATLAB – Режим доступа: <http://www.matlab.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. русский, англ.
11. [www.mathsoft.com](http://www.mathsoft.com) [Электронный ресурс]: Фирма Mathsoft Engineering & Education, Inc. (USA) – Режим доступа: <http://support.mathsoft.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
12. [www.basegroup.ru](http://www.basegroup.ru). [Электронный ресурс]: Фирма BASEGROUP Labs (Россия) – Режим доступа: <http://www.basegroup.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. русский, англ.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

## **АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

**методические указания к выполнению самостоятельных работ**

для магистров направления подготовки

15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств»

Магистерская программа – «Информационно-управляющие системы»

Форма обучения – очно-заочная

Невинномысск 2018

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО в части содержания и уровня подготовки выпускников направления **15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»**.

Методические указания содержат рекомендации по организации самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Адаптивное управление динамическими системами».

Составитель

В.Ф. Лубенцов

Ответственный редактор

канд. техн. наук Д.В. Болдырев



## Содержание

1 Подготовка к лекциям .....	4
2 Подготовка к лабораторным занятиям .....	5
3 Самостоятельное изучение материала тем .....	6
4 Подготовка к экзамену .....	9

## 1 Подготовка к лекциям

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях.

Конспект лекций лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты

плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места, определения, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось просить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

## **2 Подготовка к лабораторным занятиям**

Для того чтобы лабораторные занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнение и решение задач проводятся по рассмотренному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных вопросов лекционного курса. Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться студентом на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций, задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном решении задач нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи). Решение проблемных задач или примеров

следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждой учебной задачи должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данной задачи. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты. Решение задач данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

### **3 Самостоятельное изучение материала тем**

Конспект – наиболее совершенная и наиболее сложная форма записи. Слово «конспект» происходит от латинского «conspectus», что означает «обзор, изложение». В правильно составленном конспекте обычно выделено самое основное в изучаемом тексте, сосредоточено внимание на наиболее существенном, в кратких и четких формулировках обобщены важные теоретические положения.

Конспект представляет собой относительно подробное, последовательное изложение содержания прочитанного. На первых порах целесообразно в записях ближе держаться тексту, прибегая зачастую к прямому цитированию автора. В дальнейшем, по мере выработки навыков конспектирования, записи будут носить более свободный и сжатый характер.

Конспект книги обычно ведется в тетради. В самом начале конспекта указывается фамилия автора, полное название произведения, издательство, год и место издания. При цитировании обязательная ссылка на страницу книги. Если цитата взята из собрания сочинений, то необходимо указать соответствующий том. Следует помнить, что четкая ссылка на источник – неременное правило конспектирования. Если конспектируется статья, то указывается, где и когда она была напечатана.

Конспект подразделяется на части в соответствии с заранее продуманным планом. Пункты плана записываются в тексте или на полях конспекта. Писать его рекомендуется четко и разборчиво, так как небрежная запись с течением времени становится малопонятной для ее автора. Существует правило: конспект, составленный для себя, должен быть по возможности написан так, чтобы его легко прочитал и кто-либо другой.

Формы конспекта могут быть разными и зависят от его целевого назначения (изучение материала в целом или под определенным углом зрения, подготовка к докладу, выступлению на занятии и т.д.), а также от характера произведения (монография, статья, документ и т.п.). Если речь идет просто об изложении содержания работы, текст конспекта может быть сплошным, с выделением особо важных положений подчеркиванием или различными значками.

В случае, когда не ограничиваются переложением содержания, а фиксируют в конспекте и свои собственные суждения по данному вопросу или дополняют конспект соответствующими материалами их других источников, следует отводить место для такого рода записей. Рекомендуется разделить страницы тетради пополам по вертикали и в левой части вести конспект произведения, а в правой свои дополнительные записи, совмещая их по содержанию.

Конспектирование в большей мере, чем другие виды записей, помогает вырабатывать навыки правильного изложения в письменной форме важные теоретических и практических вопросов, умение четко их формулировать и ясно излагать своими словами.

Таким образом, составление конспекта требует вдумчивой работы, затраты времени и труда. Зато во время конспектирования приобретаются знания, создается фонд записей.

Конспект может быть текстуальным или тематическим. В текстуальном конспекте сохраняется логика и структура изучаемого произведения, а запись ведется в соответствии с расположением материала в книге. За основу тема-

тического конспекта берется не план произведения, а содержание какой-либо темы или проблемы.

Текстуальный конспект желательно начинать после того, как вся книга прочитана и продумана, но это, к сожалению, не всегда возможно. В первую очередь необходимо составить план произведения письменно или мысленно, поскольку в соответствии с этим планом строится дальнейшая работа. Конспект включает в себя тезисы, которые составляют его основу. Но, в отличие от тезисов, конспект содержит краткую запись не только выводов, но и доказательств, вплоть до фактического материала. Иначе говоря, конспект – это расширенные тезисы, дополненные рассуждениями и доказательствами, мыслями и соображениями составителя записи.

Как правило, конспект включает в себя и выписки, но в него могут войти отдельные места, цитируемые дословно, а также факты, примеры, цифры, таблицы и схемы, взятые из книги. Следует помнить, что работа над конспектом только тогда будет творческой, когда она не ограничена текстом изучаемого произведения. Нужно дополнять конспект данными из другими источниками.

В конспекте необходимо выделять отдельные места текста в зависимости от их значимости. Можно пользоваться различными способами: подчеркиваниями, вопросительными и восклицательными знаками, репликами, краткими оценками, писать на полях своих конспектов слова: «важно», «очень важно», «верно», «характерно».

В конспект могут помещаться диаграммы, схемы, таблицы, которые придадут ему наглядность.

Составлению тематического конспекта предшествует тщательное изучение всей литературы, подобранной для раскрытия данной темы. Бывает, что какая-либо тема рассматривается в нескольких главах или в разных местах книги. А в конспекте весь материал, относящийся к теме, будет сосредоточен в одном месте. В плане конспекта рекомендуется делать пометки, к каким источникам (вплоть до страницы) придется обратиться для раскрытия

вопросов. Тематический конспект составляется обычно для того, чтобы глубже изучить определенный вопрос, подготовиться к докладу, лекции или выступлению на семинарском занятии. Такой конспект по содержанию приближается к реферату, докладу по избранной теме, особенно если включает и собственный вклад в изучение проблемы.

#### **4 Подготовка к экзамену**

Экзаменационная сессия – очень тяжелый период работы для студентов и ответственный труд для преподавателей. Главная задача экзаменов – проверка качества усвоения содержания дисциплины.

На основе такой проверки оценивается учебная работа не только студентов, но и преподавателей: по результатам экзаменов можно судить и о качестве всего учебного процесса. При подготовке к экзамену студенты повторяют материал курсов, которые они слушали и изучали в течение семестра, обобщают полученные знания, выделяют главное в предмете, воспроизводят общую картину для того, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программы курса и конспект, которые указывают, что в курсе наиболее важно. Основной материал должен прорабатываться по учебнику, поскольку конспекта недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть проработан в течение семестра, а перед экзаменом важно сосредоточить внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением в памяти его краткого содержания в логической последовательности.

До экзамена обычно проводится консультация, но она не может возместить отсутствия систематической работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает лишь ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы. Польза от консультации будет только в том случае, если студент до

нее проработает весь материал. Надо учиться задавать вопросы, вырабатывать привычку пользоваться справочниками, энциклопедиями, а не быть на иждивении у преподавателей, который не всегда может тут же, «с ходу» назвать какой-либо факт, имя, событие. На экзамене нужно показать не только знание предмета, но и умение логически связно построить устный ответ.

Получив билет, надо вдуматься в поставленные вопросы для того, чтобы правильно понять их. Нередко студент отвечает не на тот вопрос, который поставлен, или в простом вопросе ищет скрытого смысла. Не поняв вопроса и не обдумав план ответа, не следует начинать писать. Конспект своего ответа надо рассматривать как план краткого сообщения на данную тему и составлять ответ нужно кратко. При этом необходимо показать умение выражать мысль четко и доходчиво.

Отвечать нужно спокойно, четко, продуманно, без торопливости, придерживаясь записи своего ответа. На экзаменах студент показывает не только свои знания, но и учится владеть собой. После ответа на билет могут следовать вопросы, которые имеют целью выяснить понимание других разделов курса, не вошедших в билет. Как правило, на них можно ответить кратко, достаточно показать знание сути вопроса. Часто студенты при ответе на дополнительные вопросы проявляют поспешность: не поняв смысла того, что у них спрашивают, начинают отвечать и нередко говорят не по сути.

Следует помнить, что необходимым условием правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон, поэтому подготовка к экзаменам не должна быть в ущерб сну. Установлено, что сильное эмоциональное напряжение во время экзаменов неблагоприятно отражается на нервной системе и многие студенты из-за волнений не спят ночи перед экзаменами. Обычно в сессию студенту не до болезни, так как весь организм озабочен одним - сдать экзамены. Но это еще не значит, что последствия неправильно организованного труда и чрезмерной занятости не скажутся потом. Поэтому каждый студент помнить о важности рационального распо-



рядка рабочего дня и о своевременности снятия или уменьшения умственного напряжения.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» Невинномысский технологический институт (филиал)

# АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки 15.04.04 –  
Автоматизация технологических процессов и производств  
очно-заочной формы обучения

Невинномысск 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Практическое занятие № 1. Одноканальная система с градиентным алгоритмом адаптации .....	3
Практическое занятие № 2. Система с пропорционально-интегральным алгоритмом изменения коэффициентов регулятора, синтезированным методом скоростного градиента .....	13
Практическое занятие № 3. Система с алгоритмом адаптации на основе второго метода Ляпунова .....	23
Практическое занятие № 4. Исследование адаптивной системы пониженного порядка .....	33
Список рекомендуемой литературы .....	40

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

### ОДНОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА С ГРАДИЕНТНЫМ АЛГОРИТМОМ АДАПТАЦИИ

*Цель занятия:* изучение свойств системы с алгоритмом адаптации, синтезированным по градиентному методу, анализ влияния темпа параметрических возмущений на качество процессов и величину управляющего воздействия.

#### 1. Основные сведения

Градиентный алгоритм относится к базовым алгоритмам адаптации. Вектор градиента всегда направлен в сторону максимального локального роста функции. Следовательно, если вектор скорости настраиваемых параметров ( $\dot{k}$ ) направить в сторону антиградиента  $\left(-\frac{\partial Q}{\partial k}\right)$ , то реализуется последовательный спуск в локальный минимум

$$\dot{k} = -\gamma \frac{\partial Q}{\partial k}. \quad (1.1)$$

Проведем синтез адаптивной системы для одноканального линейного объекта управления

$$y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i y^{(i)} = \sum_{j=0}^m b_j u^{(j)}, \quad (1.2)$$

где  $u$ ,  $y$  – управляющая и выходная переменные соответственно. Параметры объекта  $a_i$ ,  $b_j$  точно не определены, но заданы  $(n + m + 1)$ -мерной областью возможных значений  $\Omega_{ab}$ . Операторная запись уравнения (1.2) имеет вид

$$a_n(p)y = b_m(p)u, \quad (1.3)$$

где  $a_n(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_0$ ,  $b_m(p) = b_m p^m + b_{m-1}p^{m-1} + \dots + b_0$ ,  $p^i = d^i / dt^i$  – оператор  $i$ -кратного дифференцирования.

Цель управления зададим предельным соотношением

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_M(t)) = 0, \quad (1.4)$$

где  $y_M(t)$  – эталонная траектория движения, которая удовлетворяет уравнению эталонной модели

$$a_n^*(p)y_M = b_0^* r, \quad (1.5)$$

здесь  $a_n^*(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i^* p^i$ ,  $r$  – эталонное входное воздействие на систему. Оператор  $a_n^*(p)$  является устойчивым, т.е. корни уравнения  $a_n^*(p) = 0$  имеют отрицательную действительную часть.

Для определения структуры «идеального» закона управления выполним преобразование уравнений (1.2) и (1.5). Вычтем из обеих частей уравнения (1.3) выражение  $(a_n(p)y)$ :

$$0 = b_m(p)u - a_n(p)y. \quad (1.6)$$

Полагая  $y = y_M$ , запишем уравнение (1.5)

$$a_n^*(p)y = b_0^* r. \quad (1.7)$$

Прибавим к обеим частям уравнения (1.6) выражение  $(a_n^*(p)y - b_0^* r)$ :

$$a_n^*(p)y - b_0^* r = b_m(p)u - \Delta_{n-1}(p)y - b_0^* r, \quad (1.8)$$

где  $\Delta_{n-1}(p) = \sum_{i=0}^{n-1} (a_i - a_i^*) p^i$ . Далее вычтем из (1.8) уравнение (1.5):

$$a_n^*(p)e = b_m(p)u - \Delta_{n-1}(p)y - b_0^* r, \quad (1.9)$$

где  $e = y - y_M$ . Пусть «идеальный» закон управления имеет вид

$$b_m(p)u = \Delta_{n-1}(p)y + b_0^* r, \quad (1.10)$$

тогда

$$a_n^*(p)e = 0. \quad (1.11)$$

Так как полином  $a_n^*(p)$  является устойчивым по условию, то  $e \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , т.е. закон управления (1.10) позволяет обеспечить выполнение цели управления (1.4). Учитывая неизвестность коэффициентов полиномов  $b_m(p)$  и  $\Delta_{n-1}(p)$ , реальный закон управления запишем в виде

$$k^r(p)u = k(p)y + b_0^* r \quad (1.12)$$

с операторами  $k^r(p) = \sum_{i=0}^m k_i^r p^i$ ,  $k(p) = \sum_{j=0}^{n-1} k_j p^j$ .

Если в процессе настройки коэффициентов регулятора (1.12) будет выполнено  $k^r(p) \rightarrow b_m(p)$ ,  $k(p) \rightarrow \Delta_{n-1}(p)$  при  $t \rightarrow \infty$ , то  $e \rightarrow 0$ , что показывает достижение поставленной цели управления.

Для определения целевой функции введем новое рассогласование ( $\sigma$ ), которое возникает в результате замены  $y_m$  на  $y$  в уравнении эталонной модели (1.5),

$$\sigma = a_n^*(p)y - b_0^* r. \quad (1.13)$$

Если вычесть из (1.13) уравнение (1.5), то получим уравнение, описывающее связь между рассогласованиями  $e$  и  $\sigma$ :

$$a_n^*(p)e = \sigma. \quad (1.14)$$

Из (1.14) следует, что если  $\sigma \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , то в силу устойчивости  $a_n^*(p)$  имеем  $e \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Следовательно, будет выполнена поставленная цель. Это позволяет задать целевую функцию в виде

$$Q = 0.5 \sigma^2. \quad (1.15)$$

Выполним преобразования уравнения (1.13). Просуммируем уравнения объекта (1.8) и регулятора (1.12):

$$a_n^*(p)y - b_0^* r + k^r(p)u = b_m(p)u - \Delta_{n-1}(p)y - b_0^* r + k(p)y + b_0^* r,$$

приведем подобные и учтем (1.13):

$$\sigma = a_n^*(p)y - b_0^* r = (b_m(p) - k^r(p))u + (k(p) - \Delta_{n-1}(p))y. \quad (1.16)$$

Введем обозначения для вектора неизвестных параметров

$$\Delta = \text{col} \left[ b_0 \dots b_m : a_0 - a_0^* \dots a_{n-1} - a_{n-1}^* \right],$$

вектора настраиваемых параметров

$$k = \text{col} \left[ -k^r : k \right]$$

и вектора координатных переменных

$$z = \text{col} [U : Y] = \text{col} \left[ u \dots u^{(m)} : y \dots y^{(n-1)} \right].$$

Уравнение для рассогласования (1.16) примет вид

$$\sigma = (\Delta + k)^T z. \quad (1.17)$$

Алгоритм настройки коэффициентов согласно (1.1), (1.15), (1.17) имеет вид

$$\dot{\bar{k}} = -\gamma \sigma z,$$

или  $\dot{k}^r = \gamma \sigma U$ ,  $\dot{k} = -\gamma \sigma Y$ .

## 2. Методические указания

Объект управления имеет математическую модель вида

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx, \quad (1.18)$$

где  $x^T = [x_1 \ x_2]$  – вектор координат состояния,  $y$  – выходная переменная,  $u$  – управляющее воздействие,  $y, u \in R^1$ ;  $A, B, C$  – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], \quad (1.19)$$

здесь  $a_0, a_1, b$  – неизвестные коэффициенты, которые могут быть как постоянными, так и переменными. Стационарный объект управления моделируется по схеме, изображенной на рис. 1.1, нестационарный – по схеме, представленной на рис. 1.2. Желаемое поведение системы описывают уравнения эталонной модели:

$$\dot{x} = A^* x + B^* r, y_M = C^* x, \quad (1.20)$$

где  $r$  – входная переменная,

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0^* & -a_1^* \end{bmatrix}, B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ b^* \end{bmatrix}, C^* = [1 \ 0].$$

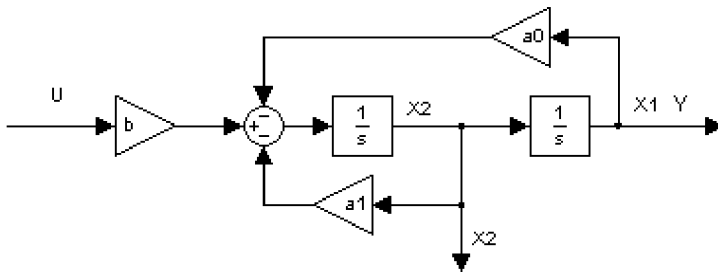


Рис. 1.1

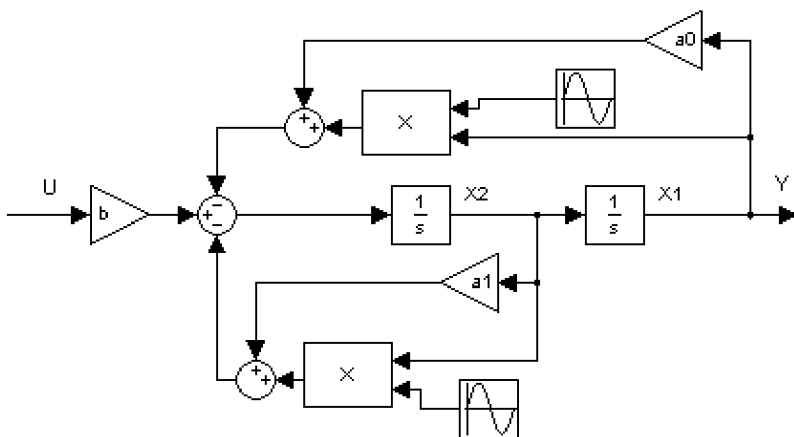


Рис. 1.2

Коэффициенты  $a_0^*$ ,  $a_1^*$ ,  $b^*$  определяются по заданным показателям качества переходного процесса, приведенным в табл. 1.1, статическая ошибка работы системы допускается равной 5%.

Закон управления формируется в виде

$$k^r(t)u = k_1(t)x_1 + k_2(t)x_2 + b^* r,$$

или

$$k^r(t)u = k_1(t)y + k_2(t)\dot{y} + b^* r. \quad (1.21)$$



Таблица 1.1

№ п/п	$a_0$	$a_1$	$b$	$\sigma\%$	$a_0$
1	2	3	2	0	2
2	1	4	1	10	4
3	4	2	4	20	5
4	4	1	4	0	4
5	0.1	0.5	0.1	30	10
6	2	10	2	0	2
7	10	2	10	0	5
8	0.5	1.5	0.5	5	3

Коэффициенты регулятора изменяются по градиентному алгоритму адаптации:

$$\begin{aligned}
 \dot{k}^r &= \gamma \sigma u, \\
 \dot{k}_1 &= -\gamma \sigma y, \\
 \dot{k}_2 &= -\gamma \sigma \dot{y}, \\
 \sigma &= a_0^* y + a_1^* \dot{y} + \ddot{y} - b^* r.
 \end{aligned} \tag{1.22}$$

Структурная схема системы с градиентным алгоритмом адаптации (1.18)–(1.22) изображена на рис. 1.3. В данном случае предполагается «идеальное» измерение требуемых производных выходных переменных. Однако в большинстве реальных технических систем для оценки производных требуется введение наблюдателя состояния или фильтра оценки производных.

Уравнение асимптотического наблюдателя (идентификатора) имеет вид

$$\dot{x}_H(t) = [A' - lC']x_H(t) + ly(t) + bu(t),$$

где

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & -a_0 \\ 1 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad C' = [0 \quad 1], \quad l^T = [l_1, l_2],$$

$$l_1 = \beta_0 - a_0, \quad l_2 = \beta_1 - a_1,$$

причем  $\varphi_H = \lambda^2 + \beta_1 \lambda + \beta_0$  – желаемый характеристический многочлен наблюдателя, коэффициенты которого определяются, исходя из требо-

ваний к динамическим свойствам:  $t_n = 0.1t_n$ ,  $\sigma_n \leq 30\%$ . Заметим, что

$$\begin{aligned}x_{2n}(t) &= y_n(t), \quad \dot{x}_{2n}(t) = \dot{y}_n(t), \\ \dot{x}_{1n}(t) &= bu + (\beta_0 - a_0)y(t) - \beta_0 y_n(t), \\ \dot{x}_{1n}(t) &= \ddot{y}_n + (2a_1 - \beta_1)\dot{y}_n - (\beta_1 + a_1)\dot{y},\end{aligned}$$

причем  $y_n(t) \rightarrow y(t)$ ,  $\dot{y}_n(t) \rightarrow \dot{y}(t)$ . Для старшей производной выходной переменной наблюдателя, которая является оценкой соответствующей производной выходной переменной системы, справедливо выражение

$$\ddot{y}_n = -a_1\dot{y}_n - a_0y_n + bu \quad \text{или} \quad \ddot{y}_n = \dot{x}_{1n} - a_1\dot{y}_n = \dot{x}_{1n} - a_1\dot{x}_{2n}.$$

Структурная схема адаптивной системы с наблюдателем изображена на рис. 1.4.

Качество работы адаптивной системы оценить с помощью показателей: перерегулирование ( $\sigma\%$ ), установившаяся ошибка ( $e_{1\text{уст}}$ ),

$$\sigma\% = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} 100, \quad y_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t), \quad e_{1\text{уст}} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t),$$

где  $y_{\max}$  – максимальное значение выходной переменной. Оценкой быстрогодействия системы выбрано время переходного процесса ( $t_n$ ), которое равно интервалу времени с начала работы системы до момента установления значения выходной переменной в диапазоне

$$y_{\infty} - e_{1\text{уст}} \leq y(t) \leq y_{\infty} + e_{1\text{уст}}.$$

Моделирование адаптивной системы рекомендуется выполнять в среде MatLab, приложение Simulink.

### 3. Порядок выполнения расчетов

3.1. Определить элементы матриц  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$  по заданным требованиям к качеству процессов (см. табл. 1.1).

3.2. Выполнить моделирование стационарного (см. рис. 1.1) и нестационарного (рис. 1.2,  $\tilde{A} = 10$ ,  $\tilde{\omega} = 1$ ) объектов, оценить устойчивость, определить показатели качества ( $\sigma\%$ ,  $t_n$ ).

3.3. Собрать схему эталонной модели на интегрирующих элементах. Получить переходную характеристику ( $r=1(t)$ ,  $x_1(0)=x_2(0)=0$ ). Определить показатели качества ( $\sigma\%$ ,  $t_n$ ).

3.4. Собрать схему адаптивной системы (1.18), (1.20)–(1.22). Параметры объекта управления приведены в табл. 1.1, схема моделирования объекта – рис. 1.1. Структурная схема адаптивной системы изображена на рис. 1.3.

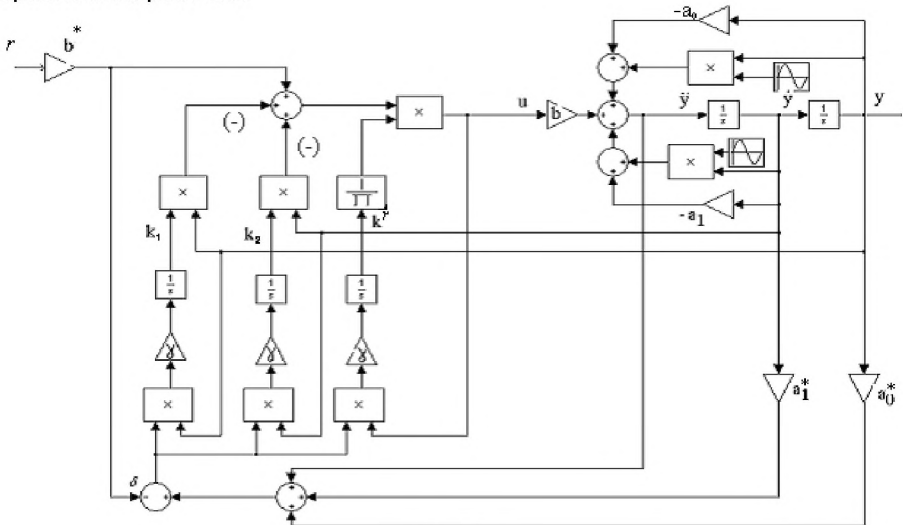


Рис. 1.3

3.5. Получить графики переходной характеристики системы ( $y(t)$ ), управляющего воздействия и процессов на выходе адаптора ( $k_1(t)$ , ( $k_2(t)$ ,  $k^r(t)$ ) при  $r(t)=1(t)$ , нулевых начальных условиях, кроме  $k^r(0)=1$ ,  $\gamma = 10$  в контурах настройки  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$  и  $\gamma^r = 0.001$  в контуре настройки  $k^r$ .

3.6. Определить показатели качества, сравнить их значения с заданными. Если качество процесса неудовлетворительное, то, изменяя  $\gamma$ , добиться достижения требуемых показателей.

3.7. Изменить начальные условия в объекте ( $x_1(0)=-1$ ,  $x_2(0)=1$ ), получить вид  $y(t)$ ,  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$ ,  $k^r(t)$ ,  $u(t)$ . Моделирование провести для различных значений  $\gamma$ . Сравнить с результатами п. 3.5. Изобразить зависимость  $\gamma$  от  $x_1(0)$  при  $\gamma^r = 0.001$  и  $x_2(0)=0$ .

3.8. Изменить модель объекта управления (рис. 1.2),  $a_0(t) = a_0 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega} t)$ ,  $a_1(t) = a_1 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega} t)$ . Провести моделирование адаптивной системы при нулевых начальных условиях, кроме  $k^r(0)$ ,  $k^r(0) = 1$ , и различных значениях  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{\omega}$ : а)  $\tilde{A}=1$ ,  $\tilde{\omega}=1$ , б)  $\tilde{A}=1$ ,  $\tilde{\omega}=10$ , в)  $\tilde{A}=10$ ,  $\tilde{\omega}=1$ . Для улучшения процессов в системе изменить значения  $\gamma$  в 10 раз. Сравнить с результатами п. 3.5.

3.9. Рассчитать параметры наблюдателя. Собрать схему системы с наблюдателем (рис. 1.4). Повторить пп. 3.4, 3.8.

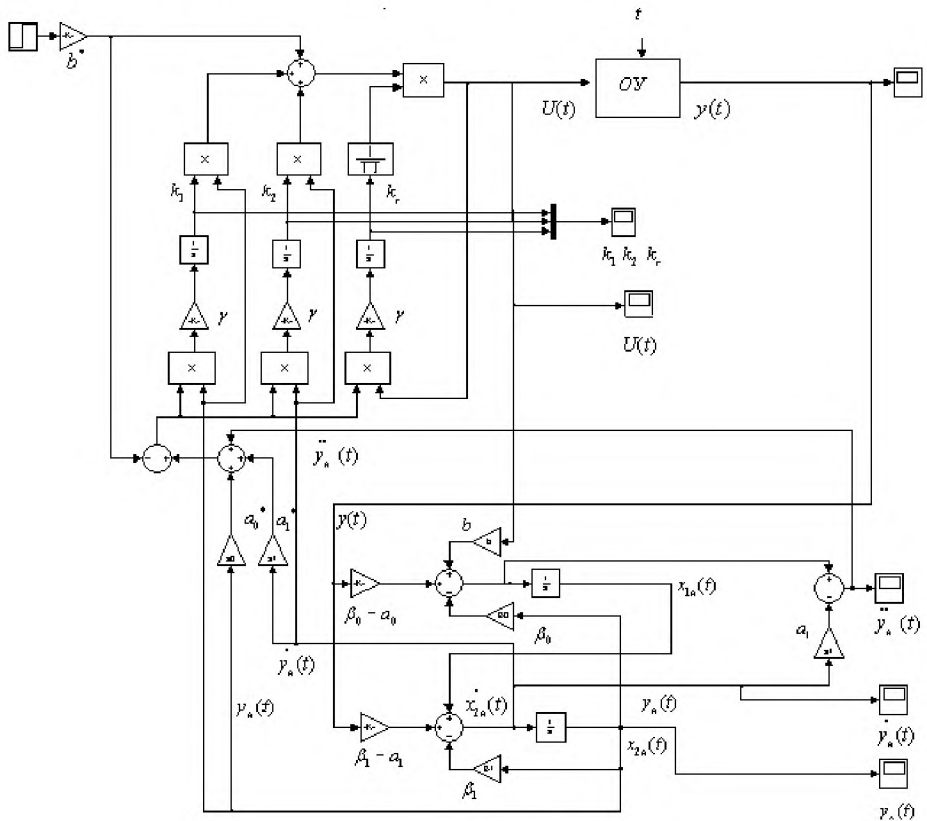


Рис. 1.4

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Классификация адаптивных систем.
2. Виды эталонных моделей, способы реализации.
3. Блок-схемы беспоисковых систем с моделью.
4. Основные блоки системы с градиентным алгоритмом адаптации.
5. Влияние начальных условий в адапторе на свойства системы.
6. Уравнение адаптивного закона управления.
7. Влияние темпа параметрических возмущений на свойства системы.
8. Расчет асимптотического наблюдателя.
9. Определение вида алгоритма адаптации, использованного в лабораторной работе.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### СИСТЕМА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫМ АЛГОРИТМОМ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛЯТОРА, СИНТЕЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ СКОРОСТНОГО ГРАДИЕНТА

*Цель занятия:* исследование свойств системы стабилизации, в которой коэффициенты регулятора изменяются по алгоритму скоростного градиента в конечно-дифференциальной форме.

#### 1. Основные сведения

Суть метода скоростного градиента заключается в следующем: настройка параметров осуществляется в направлении, противоположном скорости изменения целевого функционала вдоль траектории обобщенного настраиваемого объекта (ОНО). Алгоритмом скоростного градиента (АСГ) называется правило изменения вектора настраиваемых коэффициентов ( $\theta$ ), задаваемое уравнением вида

$$\frac{d(\theta + \Psi(x, \theta, t))}{dt} = -\Gamma \nabla_{\theta} \omega(x, \theta, t), \quad (2.1)$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор,  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  – квадратная матрица коэффициентов передачи,

$$\omega(x, \theta, t) = \frac{dQ(x, t)}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla_x Q^T f(x, \theta, t),$$

здесь  $Q(\cdot)$  – целевой функционал;  $f(x, \theta, t)$  – вектор-функция, описывающая ОНО,

$$\dot{x} = f(x, \theta, t),$$

$\psi(\cdot)$  – некоторая вектор-функция, удовлетворяющая условию псевдоградиентности

$$\psi^T \cdot \nabla_{\theta} \omega \geq 0.$$

АСГ вида (2.1) называют алгоритмом в конечно-дифференциальной форме. Частным случаем (2.1) являются алгоритмы в дифференциальной форме (в случае  $\psi = 0$ )

$$\frac{d\theta}{dt} = -\Gamma \nabla_{\theta} \omega(x, \theta, t) \quad (2.2)$$

и в конечной форме (для  $\Gamma = 0$ )

$$\theta = \theta_0 - \gamma \Psi(x, \theta, t),$$

где  $\gamma$  – шаг дискретизации.

Рассмотрим пример синтеза системы с параметрической адаптацией. Объект управления задан моделью в пространстве состояний

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.3)$$

где  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  – векторы состояния и входа ОУ;  $A$ ,  $B$  – неизвестные матрицы коэффициентов.

Эталонная модель выбрана в форме

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad (2.4)$$

где  $r \in R^m$  – задающее воздействие;  $A_M$  – гурвицева матрица.

Цель управления сформирована относительно координатного расогласования

$$\lim e(t) = 0, \quad (2.5)$$

где  $e(t) = x(t) - x_M(t)$ . Предлагаем выполнение условия управляемости объекта и наблюдаемости координат состояния.

Пусть целевой функционал выбран в форме скалярной квадратичной функции

$$Q = 0.5 e^T H e, \quad H = H^T > 0. \quad (2.6)$$

Поставленная цель управления выполняется, если  $Q \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Уравнение основного контура можно получить модальным методом, т.е. разрешив уравнение

$$(A - A_M)x(t) + Bu(t) - B_M r(t) = 0$$

относительно  $u(t)$ :

$$Bu(t) = (A_M - A)x(t) + B_M r(t),$$

или

$$u(t) = (B^T B)^{-1} B^T (A_M - A)x(t) + (B^T B)^{-1} B^T B_M r(t). \quad (2.7)$$

«Идеальное» управление можно записать в форме

$$u(t) = k_*^x x(t) + k_*^r r(t), \quad (2.8)$$

где матрицы  $k_*^x$ ,  $k_*^r$  удовлетворяют условию

$$\begin{aligned}
k_*^x &= (B^T B)^{-1} B^T (A_M - A), \quad k_*^r = (B^T B)^{-1} B^T B_M, \\
B^T B k_*^x &= B^T (A_M - A), \quad B^T B k_*^r = B^T B_M, \\
B k_*^x &= A_M - A, \quad B k_*^r = B_M.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Матрицы идеальных значений коэффициентов регулятора  $k_*^x, k_*^r$  существуют, если выполняются ранговые условия

$$\text{rank } B = \text{rank } \{B, B_M\} = \text{rank } \{B, A_M - A\}.$$

Реальный закон управления имеет вид

$$u(t) = k^x(t)x(t) + k^r(t)r(t), \tag{2.10}$$

где  $k^x(t), k^r(t)$  – матрицы настраиваемых коэффициентов регулятора,  $\theta(t) = \text{col} \{k^x(t), k^r(t)\}$ .

Для определения вида алгоритма адаптации требуется вычислить производную целевого функционала (2.6) в силу уравнений системы (2.3), (2.4), (2.10):

$$\dot{Q} = \omega(x, \theta, t) = e^T H (Ax + Bu - A_M x_M - B_M r). \tag{2.11}$$

После подстановки (2.10) в (2.11) имеем

$$\dot{Q} = e^T H (Ax + Bk^x x + Bk^r r - A_M x_M - B_M r) = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3,$$

$$\omega_1 = e^T H B k^x x, \quad \omega_2 = e^T H B k^r r, \quad \omega_3 = e^T H (Ax - A_M x_M - B_M r). \tag{2.12}$$

Определим скоростные градиенты

$$\nabla_{k^x} \omega = \nabla_{k^x} \omega_1 = B^T H e x^T,$$

$$\nabla_{k^r} \omega = \nabla_{k^r} \omega_2 = B^T H e r^T.$$

Для алгоритмов настройки коэффициентов выбираем АСГ в дифференциальной форме (2.2)

$$\dot{k}^x = -\gamma B^T H e x^T, \quad \dot{k}^r = -\gamma B^T H e r^T, \tag{2.13}$$

где  $\Gamma = \gamma I, \gamma > 0$ .

Система (2.3), (2.4), (2.10), (2.13) относится к системам с параметрической адаптацией. На основе АСГ можно синтезировать системы с сигнальной и сигнально- параметрической адаптацией. Системы с алгоритмом адаптации (2.13) сохраняют работоспособность при измене-



нии координатных и параметрических возмущений в широких пределах. Качество процессов ухудшается, если скорость изменения параметрических возмущений высокая.

С целью повышения быстродействия в контурах параметрической настройки коэффициентов регулятора можно применять пропорционально-интегральные алгоритмы адаптации в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned}\frac{dk^x}{dt} &= -\gamma B^T H e x^T - \gamma_1 \frac{d}{dt} [B^T H e x^T], \\ \frac{dk^r}{dt} &= -\gamma B^T H e r^T - \gamma_1 \frac{d}{dt} [B^T H e r^T].\end{aligned}\quad (2.14)$$

## 2. Методические указания

Рассматривается линейный одноканальный объект управления (1.18), (1.19) с параметрическими возмущениями. Желаемая динамика системы задана уравнением эталонной модели (1.20) по требованиям к качеству переходных процессов (табл. 1.1). В системе эталонная модель реализуется в виде линейного динамического звена. Согласно методу эталонного уравнения получим описание регулятора:

$$u(t) = k^x(t)x(t) + k^r(t)r, \quad (2.15)$$

или

$$u(t) = k_1(t)x_1(t) + k_2(t)x_2(t) + k^r(t)r, \quad (2.16)$$

где  $(k^x)^T = [k_1 \quad k_2]$ ,  $k^x$ ,  $k^r$  – настраиваемые коэффициенты регулятора, изменение которых осуществляется по пропорционально-интегральному алгоритму (2.14):

$$\frac{dk^x}{dt} = -\gamma B^T H E x^T - \gamma_1 \frac{d}{dt} [B^T H E x^T], \quad (2.17)$$

$$\frac{dk^r}{dt} = -\gamma B^T H E r - \gamma_1 \frac{d}{dt} [B^T H E r], \quad (2.18)$$

где  $E = x(t) - x_M(t)$ ,  $H = \{h_{ij}\}$  – матрица коэффициентов, удовлетворяющая уравнению Ляпунова

$$A_M^T H + H A_M = -D. \quad (2.19)$$

Уравнения (2.17), (2.18) можно записать в виде

$$\frac{dk_1}{dt} = -\gamma(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)x_1 - \gamma_1 \frac{d}{dt}[(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)x_1], \quad (2.20)$$

$$\frac{dk_2}{dt} = -\gamma(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)x_2 - \gamma_1 \frac{d}{dt}[(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)x_2], \quad (2.21)$$

$$\frac{dk^r}{dt} = -\gamma(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)r - \gamma_1 \frac{d}{dt}[(bh_{21}e_1 + bh_{22}e_2)r]. \quad (2.22)$$

Дифференциальные уравнения (2.17), (2.18) или (2.20)–(2.22) описывают адаптор, структурная схема которого изображена на рис. 2.1.

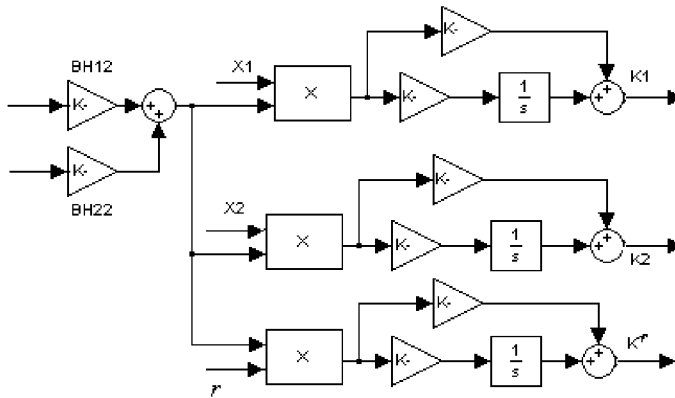


Рис. 2.1

Быстродействие адаптора определяется с помощью времени сходимости процессов  $(t_{na})$ , которое определяется аналогично  $t_n$ , но по графикам  $k_i(t)$ ,  $i$  – индекс настраиваемого коэффициента регулятора.

В случае пятипроцентных отклонений область установившихся значений коэффициентов задается неравенством

$$k_{i\infty} - 0.05k_{i\infty} \leq k_i(t) \leq k_{i\infty} + 0.05k_{i\infty},$$
$$0.95 \leq \frac{k_i(t)}{k_{i\infty}} \leq 1.05, \quad k_{i\infty} \neq 0, \quad k_{i\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} k_i(t).$$

Структурная схема замкнутой системы приведена на рис. 2.2. Система состоит из четырех основных блоков: объект управления (ОУ), модель (М), адаптивный регулятор (АР), адаптор (А). Для формирования коэффициентов регулятора и управляющего воздействия используется первая производная выходной переменной. Как правило, производная выходного сигнала не может быть измерена, поэтому требуется включение в систему либо наблюдателя, либо фильтра оценки производных. Порядок фильтра может быть равен или быть на единицу

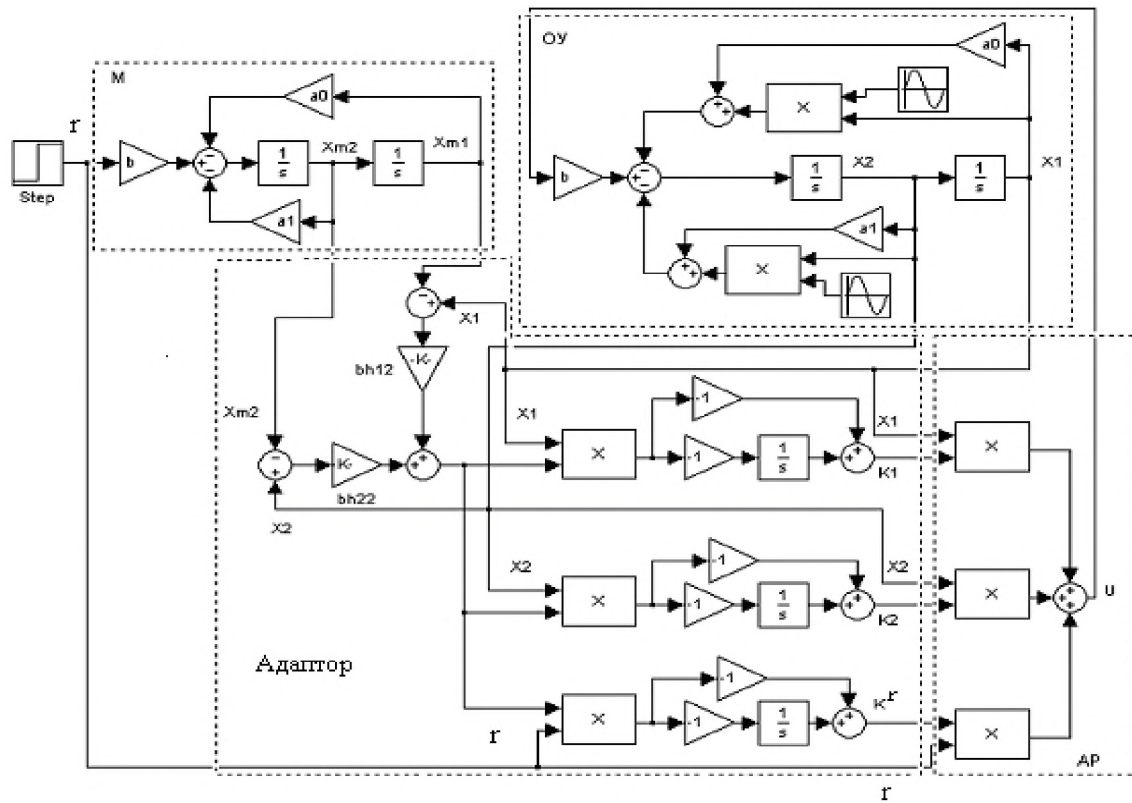
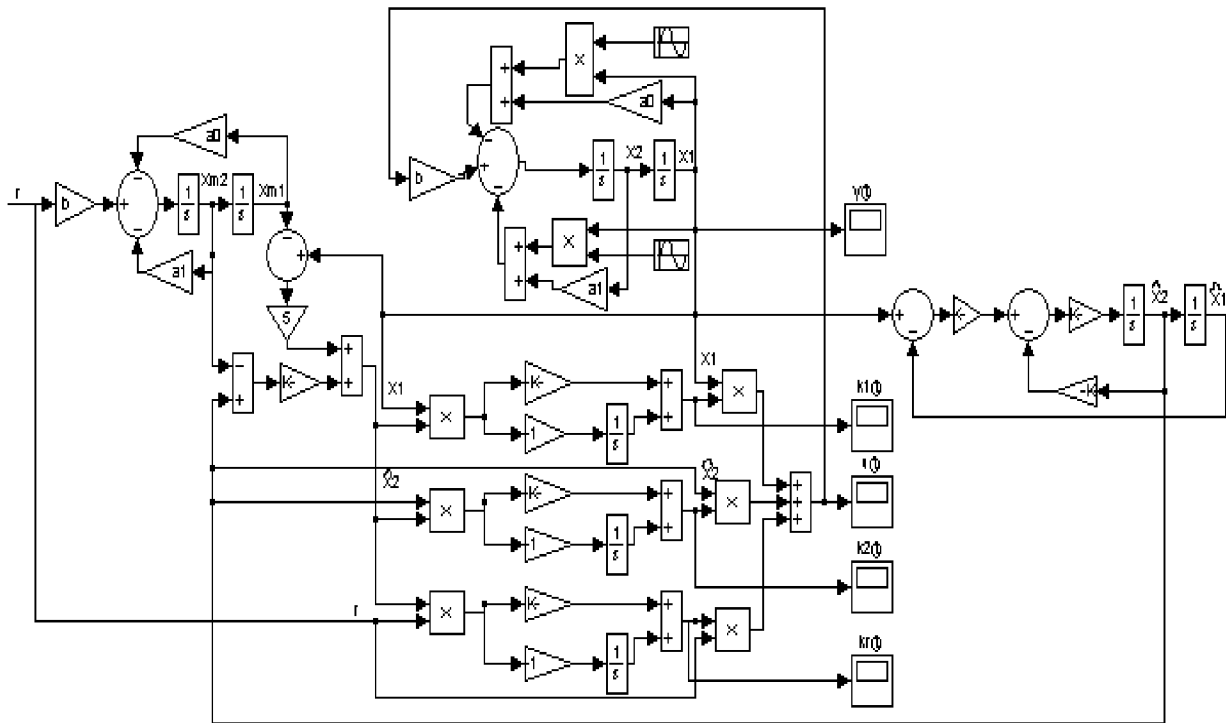


Рис. 2.2



*Рис. 2.3*

меньше порядка объекта. Постоянная времени фильтра выбирается на один или два порядка меньше, чем минимальная постоянная времени эталонной модели. Структурная схема системы с нестационарным объектом и фильтром оценки производных второго порядка изображена на рис. 2.3. Моделирование адаптивной системы рекомендуется выполнять в среде Matlab, приложение Simulink.

### 3. Порядок выполнения расчетов

3.1. Определить элементы матриц  $A_M, B_M, C_M$  по заданным требованиям к качеству процессов, статическая ошибка работы системы допускается равной 5 % (см. табл. 1.1).

3.2. Вычислить элементы матриц  $H$  как решение уравнения Ляпунова (2.19) при  $D = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ .

Записать уравнения алгоритмов адаптации (2.20)–(2.22) с вычисленными значениями коэффициентов.

3.3. Собрать схему адаптивной системы (рис. 2.2), объект управления моделировать по схеме, приведенной на рис. 1.1.

3.4. Получить графики переходной характеристики системы ( $y(t)$ ), управляющего воздействия ( $u(t)$ ) и процессов на выходе адаптора ( $k_1(t), k_2(t), k^r(t)$ ) при  $r(t)=1(t)$ , нулевых начальных условиях на интегрирующих элементах,  $\gamma = \gamma_1 = 1$ . Определить показатели качества ( $\sigma$  %,  $t_n, t_{na}$  – время сходимости процессов в адапторе).

3.5. Изменить значения коэффициентов ( $\gamma = 1, \gamma_1 = 10$  и  $\gamma = 10, \gamma_1 = 10$ ), сравнить переходные характеристики и процессы в адапторе с результатами п. 3.4 по показателям качества.

3.6. Изменить начальные условия в объекте ( $x_1(0)=-1, x_2(0)=1$ ), получить вид  $y(t), u(t), k_1(t), k_2(t), k^r(t)$ . Моделирование провести при  $\gamma = \gamma_1 = 1, \gamma = 1, \gamma_1 = 10$ . Сравнить с результатами п. 3.4.

3.7. Изменить последовательно параметры объекта в 2 раза, выполнить п. 3.4, с помощью коэффициентов передачи адаптора добиться желаемого качества процессов.

3.8. Изменить модель объекта управления:  $a_0(t) = a_0 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega}t)$ ,  $a_1(t) = a_1 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega}t)$  (рис. 1.2). Провести моделирование при нулевых начальных условиях и различных значениях  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{\omega}$ : а)  $\tilde{A} = 1$ ,  $\tilde{\omega} = 1$ , б)  $\tilde{A} = 1$ ,  $\tilde{\omega} = 10$ , в)  $\tilde{A} = 10$ ,  $\tilde{\omega} = 1$ . Для улучшения процессов в системе изменить значения  $\gamma_1, \gamma$ . Сравнить с результатами п. 3.4.

3.9\*. Построить зависимость  $u_{\max}$  от  $\alpha$ ,  $u_{\max} = \max|u(t)|$  (при  $0 \leq t \leq t_k$ ),  $\alpha = \frac{\tilde{A}}{|a_0|}$ , где  $t_k$  – время наблюдения за процессами в системе. Амплитуду параметрических возмущений выбирать из диапазона (0.1...100), например, (0.1, 1, 10, 50, 100),  $\tilde{\omega} = 1$ . Если с увеличением  $\tilde{A}$  система становится неустойчивой, то следует подбором значений  $\gamma$  вернуть систему в устойчивое состояние.

3.10. Рассчитать параметры фильтра оценки производных второго порядка. Собрать схему системы с фильтром (рис. 2.3). Повторить пп. 3.5, 3.8.

## 4. Контрольные вопросы

1. Виды и источники неопределённостей.
2. Виды возмущений.
3. Целевые критерии.
4. Алгоритм скоростного градиента, формы алгоритма.
5. Вывод пропорционально-интегрального алгоритма адаптации для системы с объектом второго порядка и целевым функционалом (2.6).
6. Влияние начальных условий в адапторе на свойства системы.
7. Влияние начальных условий в объекте на свойства системы.
8. Влияние темпа параметрических возмущений на свойства системы.
10. Расчет параметров фильтра оценки производных.

## СИСТЕМА С АЛГОРИТМОМ АДАПТАЦИИ НА ОСНОВЕ ВТОРОГО МЕТОДА ЛЯПУНОВА

*Цель занятия:* изучение свойств непрерывной адаптивной системы, синтезированной на основе второго метода Ляпунова; исследование влияния параметров возмущений на качество работы системы.

### 1. Основные сведения

Второй метод Ляпунова нашел применение в задачах синтеза адаптивных регуляторов. Рассмотрим процедуру синтеза для линейного объекта управления (ОУ), модель которого имеет вид

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

где  $x \in R^n$  – вектор состояния,  $u \in R^m$  – вектор управления;  $A, B$  – постоянные матрицы параметров объекта управления,  $\dim A = nxn$ ,  $\dim B = n \times m$ . Коэффициенты матриц  $A, B$  заранее не известны. Известно лишь, что значения коэффициентов ограничены сверху и снизу, т.е.

$$a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max}, \quad b_{\min} \leq b_j \leq b_{\max} \text{ для всех } i, j.$$

Вектор состояния считается доступным измерению, поэтому  $y = x$ ,  $u$  – вектор выходных переменных.

Желаемая динамика задается эталонной моделью вида

$$\dot{x}_M = A_M x + B_M r,$$

где  $x_M \in R^n$  – вектор состояния эталонной модели;  $r \in R^m$  – вектор задающих воздействий. Выбор эталонной модели зависит от требований, предъявляемых к замкнутой системе (времени переходного процесса, перерегулирования, астатизма и т.д.). Эталонная модель должна быть устойчивой, т.е. матрица коэффициентов  $A_M$  – гурвицева, поэтому уравнение  $\det(pI - A_M) = 0$  имеет все корни с отрицательной вещественной частью,  $I$  – единичная матрица соответствующей размерности,  $B_M$  – матрица полного ранга.



Пусть цель функционирования системы задана предельным уравнением

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad e(t) = x(t) - x_M(t),$$

где  $e(t)$  – ошибка системы.

Объект управления подвержен влиянию параметрических возмущений. Поэтому в дальнейшем рассмотрим синтез системы с параметрической адаптацией.

Сначала полагаем, что параметры ОУ известны. Для получения структуры «идеального» регулятора запишем уравнение в отклонениях

$$\dot{e}(t) = A_M e(t) + (A - A_M)x(t) + Bu(t) - B_M r(t).$$

Условие разрешимости задачи синтеза имеет вид

$$(A - A_M)x(t) + Bu(t) - B_M r(t) = 0,$$

разрешая это уравнение относительно  $u(t)$ , имеем

$$Bu = B_M r - (A - A_M)x,$$

домножим слева каждую часть уравнения на  $B^T$

$$B^T Bu = B^T B_M r - B^T (A - A_M)x,$$

полагаем  $\det(B^T B) \neq 0$ , тогда

$$u = (B^T B)^{-1} B^T (B_M r - (A - A_M)x).$$

Если реализовать найденный закон управления, то система будет описываться уравнением

$$\dot{e}(t) = A_M e(t).$$

Решение этого уравнения равномерно асимптотически устойчиво в силу гурвицевости матрицы  $A_M$ . Следовательно, при «идеальном» законе управления поставленная цель достигается.

Уравнение «идеального» закона управления можно записать в виде

$$u(t) = \bar{k}_*^T \bar{k}_*^x x(t) + \bar{k}_*^r r(t),$$

где  $\bar{k}_*^r, \bar{k}_*^x$  – матрицы «идеальных» коэффициентов регулятора. Соотношения между коэффициентами при  $x$ :

$$\bar{k}_*^r \bar{k}_*^x = (B^T B)^{-1} B^T (A_M - A),$$

$$(B^T B) \bar{k}_*^r \bar{k}_*^x = B^T (A_M - A),$$

$$B \bar{k}_*^r \bar{k}_*^x = A_M - A,$$

для коэффициентов при  $r$ :

$$\bar{k}_*^r = (B^T B)^{-1} B^T B_M,$$

$$B^T B \bar{k}_*^r = B^T B_M,$$

$$B \bar{k}_*^r = B_M,$$

кроме того

$$B_M \bar{k}_*^x = A_M - A.$$

Полученные условия называются условиями согласования модели и ОУ.

«Идеальный» закон управления не реализуем, так как параметры ОУ не известны. Поэтому выполним замену идеальных коэффициентов регулятора  $(\bar{k}_*^r, \bar{k}_*^x)$  настраиваемыми  $(k^r, k^x)$ . Структура регулятора описывается уравнением

$$u(t) = k^r(t)k^x(t)x(t) + k^r(t)r(t). \quad (3.1)$$

На следующем этапе расчета системы определяются уравнения, в соответствии с которыми настраиваются коэффициенты регулятора, т.е. алгоритмы изменения  $k^r, k^x$ . Получим описание обобщенного настраиваемого объекта в отклонениях. Введем обозначения

$$\delta^x = k^x - \bar{k}_*^x, \quad \delta^r = (\bar{k}_*^r)^{-1} - (k^r)^{-1},$$

тогда

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_M e + B_M (k^x - \bar{k}_*^x) x + B_M \left[ (\bar{k}_*^r)^{-1} k^r - I \right] (k^x x + r) = \\ &= A_M e + B_M \left[ \delta^x x + \delta^r k^r (r + k^x x) \right]. \end{aligned}$$

Введем расширенную матрицу отклонений настраиваемых коэффициентов от их «идеальных» значений

$$\theta = (\delta^x; \delta^r)$$

и вектор сенсоров, элементы которого измеряются или вычисляются на основе измерений

$$S = \begin{pmatrix} x \\ k^r (r + k^x x) \end{pmatrix}, \dim S = p \times 1, p = n + m.$$

Уравнение для ошибки примет вид

$$\dot{e} = A_M e + B_M \theta S.$$

Для исследования системы используем функцию вида

$$V = 0.5 e^T H e + 0.5 \operatorname{tr}(\theta^T \Gamma^{-1} \theta), \quad H = H^T, \quad \Gamma = \Gamma^T,$$

где  $\operatorname{tr}(\cdot)$  – след матрицы (сумма элементов главной диагонали).

Определим производную функции  $V$  по времени:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T H \dot{e} + \operatorname{tr}(\dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta) = e^T H A_M e + e^T H B_M \theta S + \operatorname{tr}(\dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta) = \\ &= e^T H A_M e + \operatorname{tr}[(B_M^T H e S^T + \Gamma^{-1} \dot{\theta})^T \theta]. \end{aligned}$$

Вторая составляющая уравнения обращается в ноль, если

$$\dot{\theta} = -\Gamma B_M^T H e S^T, \quad \Gamma = \Gamma^T > 0.$$

Производная исследуемой функции принимает вид

$$\dot{V} = e^T H A_M e < 0,$$

отрицательная определенность функции следует из гурвицевости матрицы коэффициентов эталонной модели. Матрица  $H$  удовлетворяет уравнению Ляпунова:

$$A_M^T H + H A_M = -Q, \quad Q = Q^T > 0.$$

Полагая медленное изменение коэффициентов  $\dot{k}_*^x = 0$ ,  $\dot{k}_*^r = 0$  и учитывая ранее введенные обозначения, получим вид алгоритмов адаптации:

$$\dot{k}^x = -\Gamma_1 B_M^T H e x^T, \quad (3.2)$$

$$\dot{k}^r = -k^r \Gamma_2 B_M^T H e (r + k^x x)^T (k^r)^T k^r, \quad (3.3)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_i = \Gamma_i^T > 0.$$

## 2. Методические указания

Рассматривается линейный одноканальный объект управления (1.18), (1.19) с параметрическими возмущениями. Желаемая динамика системы задается уравнением эталонной модели (1.20) по требованиям к качеству переходных процессов, приведенных в табл. 1.1 (статическая ошибка работы системы равна 5 %). В системе эталонная модель реализуется в виде линейного динамического звена второго порядка, дифференциальное уравнение, записанное относительно выходной переменной, имеет вид

$$\ddot{y}_M + a_{M1} \dot{y}_M + a_{M0} y_M = b_M r.$$

В данном случае основной контур (3.1) описывается уравнением

$$u(t) = k_0 k^r(t) (k_1(t) x_1 + k_2(t) x_2 + r), \quad (3.4)$$

где  $k_0 = \text{const}$ . Алгоритм адаптации (3.2), (3.3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{k}^x &= -\gamma_1 \begin{bmatrix} 0 & b_M \end{bmatrix} H \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}, \\ \dot{k}^r &= \lambda_2 (k^r)^3 \begin{bmatrix} 0 & b_M \end{bmatrix} H \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} (r + k_1 x_1 + k_2 x_2), \end{aligned} \quad (3.5)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2 = \text{const}$  – коэффициенты передачи адаптора,  $e_1 = x_1 - x_{M1}$ ,  $e_2 = x_2 - x_{M2}$ ,  $x_{M1} = y_M$ ,  $x_{M2} = \dot{y}_M$ ,  $k^x = [k_1 \quad k_2]$ ,  $\dim H = 2 \times 2$ ,  $H = \text{const}$ ,  $H = H^T$ ,  $H > 0$ ,  $H$  – матрица коэффициентов квадратичной формы, выбранной для исследования устойчивости адаптивной системы,  $V = x^T H x$ . Элементы матрицы  $H$  определяются как решение матричного уравнения Ляпунова

$$A_M^T H + H A_M = -Q, \quad Q = Q^T, \quad Q > 0. \quad (3.6)$$

Схема системы с нестационарным объектом управления и измеряемой производной выходной переменной изображена на рис. 3.1.

### 3. Порядок выполнения расчетов

3.1. Определить элементы матриц  $A_M$ ,  $B_M$ ,  $C_M$  по заданным требованиям к качеству процессов (см. табл. 1.1).

3.2. Вычислить элементы матриц  $H$  как решение уравнения Ляпунова (3.6), полагая  $Q = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ .

3.3. Записать уравнения алгоритмов адаптации (3.5) с вычисленными значениями коэффициентов.

3.4. Собрать схему эталонной модели (1.20) на интегрирующих элементах. Получить переходную характеристику ( $r(t) = 1(t)$ ,  $x_{M1}(0) = x_{M2}(0) = 0$ ). Определить показатели качества:  $\sigma$  %,  $t_n$ .

3.5 Собрать схему адаптивной системы (рис. 3.1), объект управления моделировать по схеме, приведенной на рис. 1.1 (см. лаб. работу № 1). Получить графики переходной характеристики системы ( $y(t)$ ), управляющего воздействия ( $u(t)$ ) и процессов на выходе адаптора ( $k_1(t), k_2(t), k^r(t)$ ) при  $r(t) = 1(t)$ , нулевых начальных условиях по координатам состояния,  $\gamma_1 = 10$ ,  $\gamma_2 = 1$ ,  $k^r(0) = 1$ . Определить показатели качества ( $\sigma$  %,  $t_n, t_{na}$ ).

3.6. Изменить значения коэффициентов передачи адаптора так, чтобы показатели качества выходного процесса соответствовали эта-

лонным значениям, полученным в п. 3.4. Сравнить переходные характеристики и процессы в адапторе с результатами п. 3.5 по  $\sigma$  %,  $t_n$ ,  $t_{na}$ .

3.7. Изменить начальные условия в объекте ( $x_1(0) = -1$ ),  $x_2(0) = 1$ ), получить вид  $y(t)$ ,  $u(t)$ ,  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$ ,  $k^r(t)$ . Моделирование провести при  $\gamma_2 = 1$  и различных  $\gamma_1$ :  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_1 = 10$ . Сравнить результат с п. 3.5.

3.8. Изменить последовательно параметры объекта  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b$  в 2 раза, выполнить задание п. 3.5.

3.9. Изменить модель объекта управления  $a_0(t) = a_0 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega}t)$ ,  $a_1(t) = a_1 + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega}t)$ . Провести моделирование при нулевых начальных условиях и различных значениях  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{\omega}$ : а)  $\tilde{A} = 1$ ,  $\tilde{\omega} = 1$ , б)  $\tilde{A} = 1$ ,  $\tilde{\omega} = 10$ , в)  $\tilde{A} = 10$ ,  $\tilde{\omega} = 1$ . Для достижения эталонных показателей качества изменить значения  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ .

3.10\*. Построить зависимость  $u_{\max}$  от  $\alpha$  (см. п. 3.8 лаб. работы № 1).

3.11 Выполнить расчет наблюдателя состояния (см. методические указания к лаб. работе № 1). Собрать схему системы с наблюдателем (рис. 3.2). Выполнить исследование системы, повторив пп. 3.5, 3.6, 3.9.

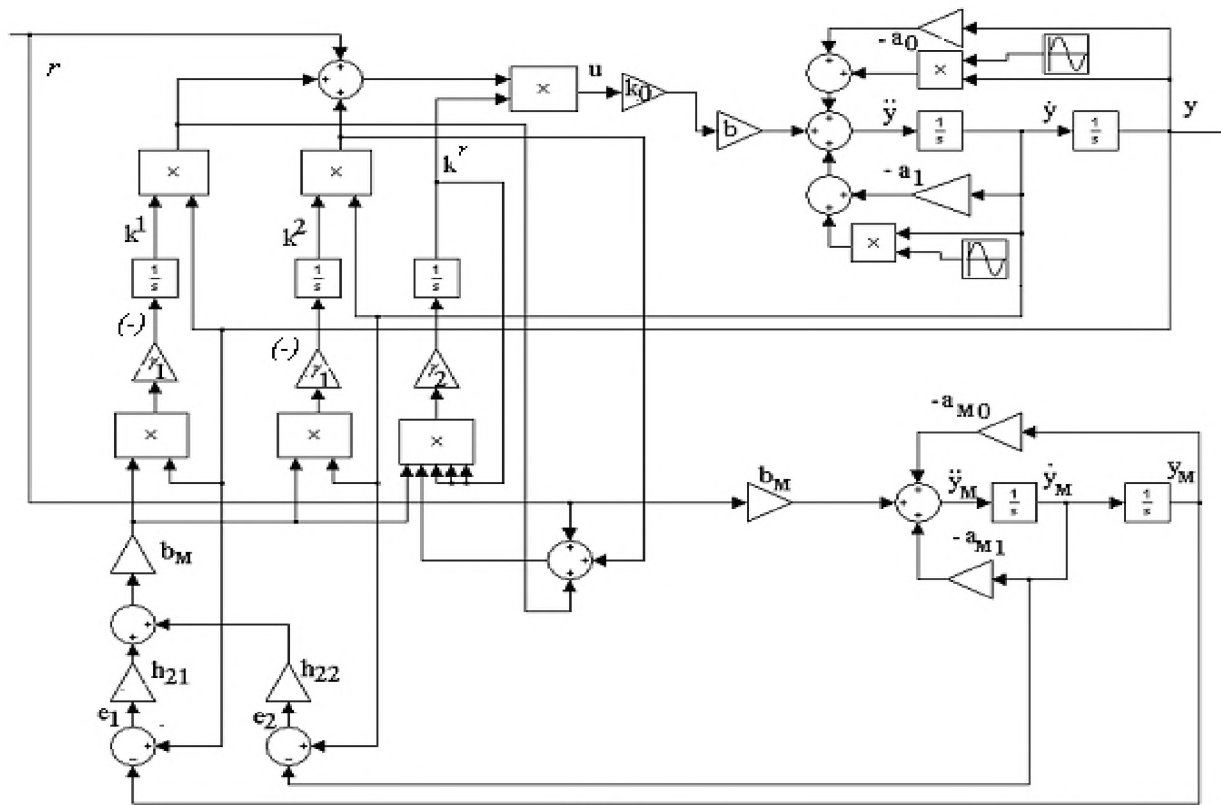


Рис. 3.1

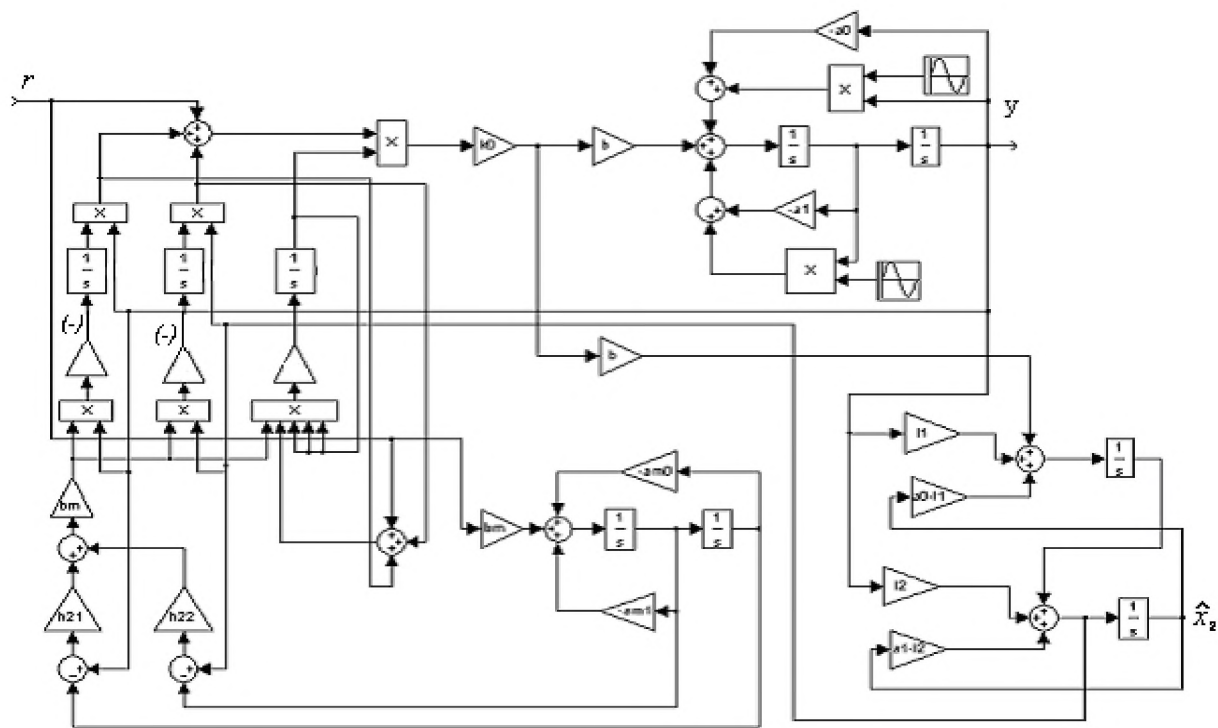


Рис. 3.2



#### **4. Контрольные вопросы**

1. Гипотеза квазистационарности.
2. Постановка задачи адаптивного управления.
3. Основные этапы синтеза беспоисковых адаптивных систем.
4. Последовательность расчета адаптивной системы на основе второго метода Ляпунова.
5. Влияние начальных условий в адапторе на свойства системы.
6. Влияние темпа параметрических возмущений на свойства системы.
7. Определение закона управления.
8. Определение алгоритма адаптации.
9. Структурная схема адаптивной системы.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА

*Цель занятия:* изучение свойств системы с алгоритмом адаптации, синтезированным по методу старшей производной, исследование возможности понижения порядка адаптивного регулятора.

### 1. Основные сведения

Метод вектора скорости или, в частном случае, метод старшей производной может быть использован для синтеза алгоритма настройки коэффициентов регулятора. В процессе работы системы собирается и анализируется априори неизвестная информация о свойствах объекта управления. Основным источником такой информации являются производные выходной переменной или вектор первых производных координат состояния, отсюда название метода. Полученная информация используется в адапторе для изменения значений коэффициентов регулятора. Это позволяет создать «быстрый» адаптор для парирования быстроменяющихся возмущений. Оценивание требуемых производных осуществляется с помощью малоинерционного линейного фильтра. Уравнение основного контура, как и в предыдущих системах, определяется методом эталонного уравнения.

В адаптивных системах изменение параметров регулятора направлено на подавление возмущений, действующих на объект управления. Поэтому, как правило, число настраиваемых параметров определяется действующими возмущениями. Уменьшение количества контуров адаптации может являться следствием уменьшения параметрических возмущений, которые учитываются в модели объекта при неизменных условиях его функционирования. Один из способов изменения модели объекта основан на применении ряда Тейлора. Для неизвестных параметров  $a_i(t)$  и аддитивного возмущения  $M(t)$  остаются в силе предположения об ограниченности амплитуды и темпа их изменения. Данным условиям удовлетворяет большой класс объектов, например, динамические системы с периодическими коэффициентами, к которым относятся электрические контуры с переменными значениями сопро-

тивлений. Периодическими аддитивными возмущениями могут быть моменты сопротивлений в механической системе с упругими колебаниями или в трехфазном асинхронном двигателе при переменной нагрузке, которая встречается, например, в ленточном конвейере.

## 2. Методические указания

В работе рассматривается нестационарный линейный объект управления

$$\dot{x} = Ax + Bu + M(t), \quad y = Cx, \quad (4.1)$$

где  $x^T = [x_1, x_2, x_3]$  – вектор координат состояния;  $y$  – выходная переменная;  $u$  – управляющее воздействие;  $y, u \in R^1$ ;  $A, B, C$  – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0],$$

где  $a_i$  – неизвестные коэффициенты. Желаемые свойства системы стабилизации задаются управлением эталонной модели (блок желаемой динамики)

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M r, \quad y_M = C_M x_M, \quad (4.2)$$

здесь  $r$  – эталонный входной сигнал системы,

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_{M0} & -a_{M1} & -a_{M2} \end{bmatrix}, \quad B_M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_M \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0].$$

Параметры модели объекта и желаемые показатели качества процессов замкнутой системы приведены в табл. 4.2; статическая ошибка допускается равной 5 %. Закон управления определяется методом эталонного уравнения,

$$u(t) = b^{-1}(F + a_1 \hat{x}_2 + a_2 \hat{x}_3 + a_0 \hat{x}_1 + k_1 x_1 - k_0),$$

$$u(t) = b^{-1} \left( \sum_{i=1}^3 (a_{(i-1)} - a_{m(i-1)}) \hat{x}_i + b_m r + k_1 x_1 - k_0 \right), \quad (4.3)$$

где  $\hat{x}_i$  – оценки координат состояния. Изменение  $k_1(t), k_0(t)$  осуществляется согласно алгоритмам адаптации

$$\begin{aligned} \dot{k}_0(t) &= \gamma_0 (\hat{x}_3 - F), \\ \dot{k}_1(t) &= -\gamma_1 (x_1 (\hat{x}_3 - F)), \end{aligned} \quad (4.4)$$

где  $F = \dot{x}_{3M}$ ,  $F$  – функция, описывающая желаемые динамические свойства замкнутой системы. Оценки координат состояния  $\hat{x}_i$  получаются с помощью линейного фильтра

$$\mu \dot{\hat{x}} = A_\Phi \hat{x} + B_\Phi x_1, \quad y = C_\Phi \hat{x},$$

где  $\mu$  – малый параметр;  $A_\Phi, B_\Phi, C_\Phi$  – матрицы коэффициентов, причем  $A_\Phi$  – гурвицева матрица,

$$A_\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_{\Phi 0} & -a_{\Phi 1} & -a_{\Phi 2} \end{bmatrix}, \quad B_\Phi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_\Phi \end{bmatrix}, \quad C_\Phi = [1 \ 0 \ 0].$$

С учетом уравнений фильтра (4.5) и эталонной модели (4.2) функция  $F(\cdot)$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} F &= -a_{m0} x_1 - a_{m1} \hat{x}_2 - a_{m2} \hat{x}_3 + b_m r, \\ x_{3M} &= \hat{x}_3, \quad x_{2M} = \hat{x}_2, \quad x_{1V} = x_1. \end{aligned}$$

Структурная схема адаптивной системы с вектором скорости пониженного порядка изображена на рис. 4.1.

Адаптивная система (4.1), (4.3), (4.4), (4.5) имеет пониженный порядок, так как парирование трех параметрических возмущений  $a_i$  и одного аддитивного возмущения  $M(t)$  осуществляется с помощью двух контуров адаптации.

### Порядок выполнения расчетов

- 3.1. Определить элементы матриц  $A_M, B_M$  по заданным показателям к качеству процессов (табл. 4.2).
- 3.2. Определить элементы матриц  $A_\Phi, B_\Phi$ , выбирая  $t_{n\Phi} \leq 0.01 t_n$ .
- 3.3. Собрать схему адаптивной системы (рис. 4.1).
- 3.4. Получить графики переходной характеристики системы ( $y(t)$ ), управляющего воздействия ( $u(t)$ ) и процессов на выходе адаптора ( $k_0(t), k_1(t)$ ) при  $r(t) = 1(t), M(t) = 0$ , нулевых начальных условиях,  $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ . Определить показатели качества ( $\sigma$  %,  $t_n, t_{nagi}$  – время сходимости процессов в адапторе).

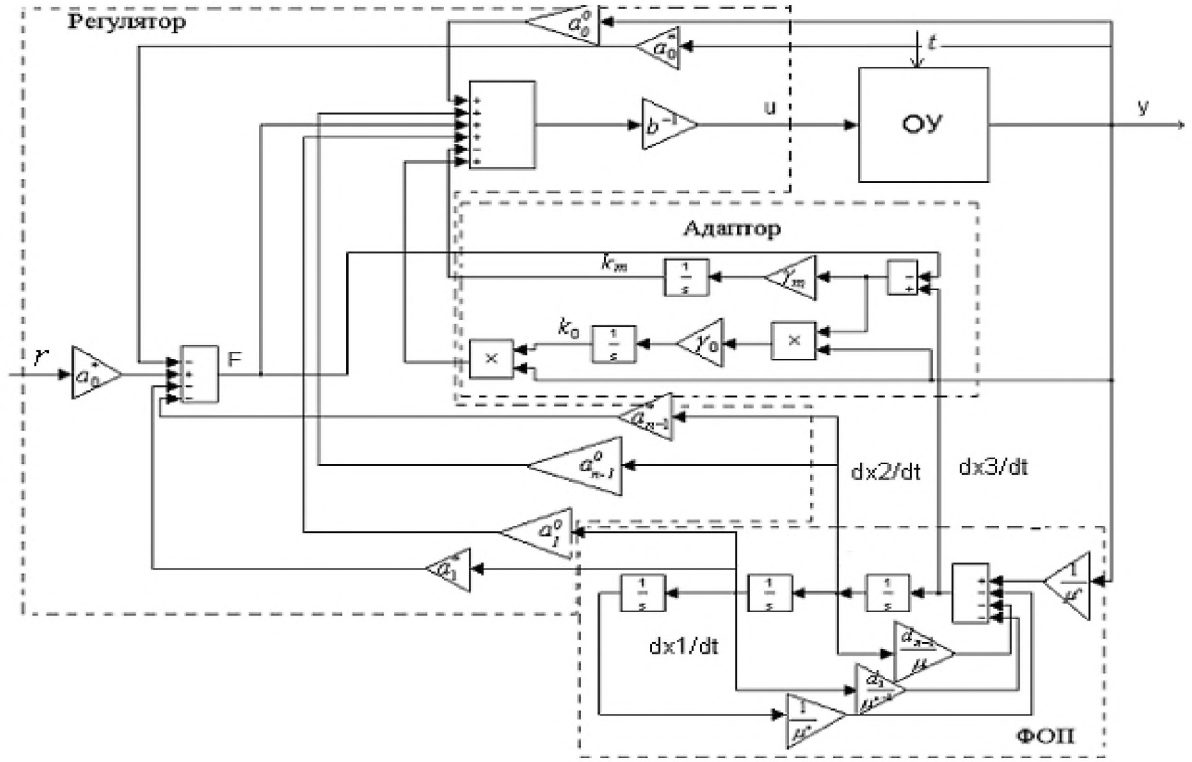


Рис. 4.1

3.5. Выполнить п. 3.4 при  $M(t) = \sin t$ .

3.6. Изменить значения коэффициентов передачи адаптора  $\gamma_0 = \gamma_1 = 10$ . Сравнить переходные характеристики и выходные процессы в адапторе с результатами п. 3.5 по  $\sigma \%$ ,  $t_n$ ,  $t_{nagi}$ .

3.7. Изменить последовательно параметры объекта в 2 раза,  $x_1(0) = x_2(0) = 0$ . Выполнить п. 3.4, установив значения коэффициентов передачи адаптора, при которых качество процессов удовлетворяет заданным показателям.

3.8. Изменить модель объекта управления

$$a_i(t) = a_i + \tilde{A} \sin(\tilde{\omega}t), \quad i = [0, 1, 2].$$

Провести моделирование при нулевых начальных условиях и различных значениях  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{\omega}$ : а)  $\tilde{A}=1$ ,  $\tilde{\omega}=1$ , б)  $\tilde{A}=1$ ,  $\tilde{\omega}=10$ , в)  $\tilde{A}=10$ ,  $\tilde{\omega}=1$ . Для улучшения процессов в системе следует увеличить значения  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$ . Определить показатели качества. Сравнить результат с п. 3.4.

Т а б л и ц а 4.2

№ п/п	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$b$	$\sigma\%$	$t_n$
1	2	3	2	2	0	2
2	1	4	0.5	1	10	4
3	4	2	4	4	20	5
4	4	1	5	4	0	4
5	0.1	0.5	2	0.1	30	10
6	2	10	2	2	0	2
7	10	2	6	10	0	5

3.9. Построить зависимость  $u_{\max}$  от  $\alpha$ ,

$$u_{\max} = \max |u(t)|, \quad \alpha = \frac{\tilde{A}}{|a_0|}, \quad 0 \leq t \leq t_k,$$

где  $t_k$  – время наблюдения за процессом в системе. Амплитуду параметрических возмущений выбирать из диапазона (0.1, ..., 100), например (0.1, 1, 10, 50, 100),  $\tilde{\omega} = 1$ . Переходные процессы в системе должны

удовлетворять заданным показателям качества. Значения  $\gamma_i$  выбирать от 1 до 200 в зависимости от амплитуды  $\tilde{A}$ . Если после увеличения коэффициента передачи адаптора, показатели качества процессов неудовлетворительные, то следует уменьшить постоянную времени фильтра оценки производных.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Определение априорной и текущей информации, источники информации, ее использование.
2. Определение типа адаптации (параметрическая, сигнальная, сигнально-параметрическая).
3. Структурная схема системы с алгоритмом адаптации, синтезированным методом старшей производной.
4. Определение уравнения адаптивного закона управления.
5. Расчет параметров фильтра оценки производных.
6. Влияние темпа параметрического возмущения на величину ресурса управления.
7. Влияние темпа параметрических возмущений на свойства системы (показатели качества выходного процесса).
8. Влияние начальных условий в адапторе на свойства системы.



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов В.Н.* Адаптивное управление в технических системах: Учебное пособие / В.Н. Антонов, В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин. – СПб.: Изд-во С.-Петербург ун-та, 2001. – 244 с.
2. *Андреев Ю.Н.* Управление конечномерными линейными объектами. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
3. *Востриков А.С.* Синтез нелинейных систем методом локализации. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990.
4. *Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.
5. *Мирошник И.В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
6. *Павлов В.Н.* Системы прямого адаптивного регулирования / В.Н. Павлов, И.Г. Соловьев. – М.: Наука, 1989. – 136 с.
7. *Солодовников В.В.* Корневые методы анализа систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Г. Коньков. – М.: МВТУ, 1986. – 60 с.
8. *Шпилевая О.Я.* Адаптивная стабилизация систем с параметрической неопределенностью на основе принципа локализации // Проблемы управления и информатики. – Киев. – № 6. – 2004. – С. 19–25.